

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Insinöörیتieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta
Rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma
Pohjarakennus ja maamekaniikka

Essi Hartman

**PAALUPERUSTUKSIIN KOHDISTUVIEN SIVU-
KUORMITUSTEN VÄHENTÄMINEN - TOUKORAN-
NAN SUOJASEINÄ**

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskohteen diplomityö, joka on jätetty opinnäytetyönä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 20.2.2008

Valvoja: Professori Pauli Vepsäläinen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Seppo Rämö

Tekijä:	Essi Hartman		
Diplomityö:	Paaluperustuksiin kohdistuvien sivukuormitusten vähentäminen – Toukorannan suojaseinä		
Päivämäärä:	20.2.2008	Sivumäärä:	84 s.
Professuuri:	Pohjarakennus ja maamekaniikka	Koodi:	Rak-50
Valvoja:	Professori Pauli Vepsäläinen		
Ohjaaja:	DI Seppo Rämö		
Avainsanat:	Sivukuorma, sivuvastus, sivusiirtymät, FEM-menetelmä, paaluryhmä		
<p>Paalujen käyttö perustuu niiden kykyyn johtaa paalun akselin suuntaisia kuormia kanta-valle pohjalle. Toisinaan paalutuksiin kohdistuu kuitenkin paalun sivulta kuormitus, jolla on merkitystä paalun kantavuuteen. Vaakakuorma vaikuttaa paalun kantavuuteen lisää-mällä, erityisesti pehmeässä savimaassa, nurjahduksen ja paalun katkeamisen vaaraa. Vaakakuormitusta aiheuttavat mm. paalutusten vieressä sijaitseva kaivanto, penger tai suuri pintakuorma. Vaakakuormasta aiheutuvilla sivusiirtymillä on merkitystä paitsi paa-lun rakenteelliseen kestävyys, myös paalurakenteiden kannatteleman rakenteen vaka-vuuteen ja kestävyys.</p> <p>Pohjarakentamista käsittelevissä ohjeissa esiteltävät laskentamenetelmät ovat usein yk-sinkertaisiin tehtäviin soveltuvia, joilla voidaan arvioida suuripiirteisesti rakenteisiin kohdistuvia voimia, kun ollaan päättämistä millaisia rakenteita perustuksiin on tulossa. Kun halutaan saavuttaa tarkka mallinnus maaperästä ja siinä liikkuvista voimista, tulevat monimutkaisemmat mallinnusmenetelmät ajankohtaisiksi. Tällöin esimerkiksi element-timenetelmä (FEM-menetelmä) on hyvä ratkaisu. Tässä diplomityössä elementtimene-telmää käytettiin Plaxis-ohjelman kautta. Tärkeintä on kuitenkin valita juuri se lasken-tamenetelmä, joka parhaiten soveltuu kyseiseen tehtävään.</p> <p>Toukorannan suojaseinän (suuret RR711-paalut 3,0 metrin välein) tarkoituksena oli estää paalulaatan paaluihin kohdistuvia sivukuormituksia. Rakennusalueen, joka hyvin peh-meän saven päällä, vieressä sijaitsee epävakaa ja hieman epäonnistunut louhetäyttöpenger, joka ”kelluu” savikerroksessa ja vajoaa siihen jatkuvasti. Vaarana olikin, että se vajoaisi paalulaattarakenteen alle taivuttaen laatan paaluja. Tätä ehkäistiin rakentamalla suojaseinä, johon sivukuorman aiheuttamat voimat kohdistuvat ja siirtyvät sen omaan muodonmuutokseensa.</p> <p>Tämän diplomityön tarkoitus oli käsitellä tekijöitä, jotka vaikuttavat sivukuormitettujen paalutusten suunnitteluun sekä kuinka suuret voimat syntyvät maaperän liikkeistä sivu-kuormituksen johdosta. Maaperää mallinnettiin FEM-menetelmällä Plaxis-ohjelmalla.</p>			

Author:	Essi Hartman		
Thesis:	Reduction of lateral loads on pile foundations – The protective pile wall of Toukoranta		
Date:	20.2.2008	Number of pages:	84 p
Professorship:	Soil Mechanics and Foundation Engineering	Code:	Rak-50
Supervisor:	Pauli Vepsäläinen, Professor		
Instructor:	Seppo Rämö, M.Sc (Tech)		
Key Words:	Lateral load, lateral pile resistance, lateral deflections, FEM method, pile group		
<p>The use of piles is based on their ability to distribute loads from the structures above to the load bearing soil below. Occasionally though, piles are subjected to lateral loads which have a significant role in determining bearing capacity of piles. Lateral loads can lower bearing capacity by increasing the risk of bulging and pile breaking. Lateral pressure can increase due to an excavation, an embankment or a large surface load situated next to the pile structures. Horizontal pile displacement caused by lateral load has an effect not only on piles structural durability but also on the durability of the structures supported by piles.</p> <p>Finnish instruction manuals discussing the calculation methods of geotechnical engineering introduce mainly formulas suited for fairly simple geotechnical tasks. These methods are good when estimating the magnitude of forces affecting designing. More complex calculation and modelling methods come to question when an accurate model of the soil and foundation is needed and the circumstances are unusual. In such cases for example finite element method (FEM) is a good solution to use. In this thesis FEM method was used to model the soil conditions by using Plaxis. Most important factor in any case is to choose the appropriate calculation method for the task in question.</p> <p>The protective pile wall of Toukoranta (massive RR700 piles 3,0 meters apart) was designed to reduce lateral loads from harming the pile slab foundations. Construction area, which is situated on soft clay soil, has an embankment consisting of mainly large boulders mixed with clay next to it. The embankment is “floating” on the clay soil and sinking slowly in it. The danger laid in the possibility that the embankment would sink under the pile slab structure and bend the piles. To prevent this, the protective wall structure was designed.</p> <p>This thesis consists of factors that have an influence on the design of laterally loaded pile structures and describe ways to calculate forces coming from soil movements. The soil was modelled by using FEM method on Plaxis.</p>			

Alkusanat

Tämä työ on tehty diplomityönä Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy:ssä osana Helsingin kaupungin Toukorannan esirakentamishanketta. Työn valvojana on toiminut professori Pauli Vepsäläinen ja ohjaajana diplomi-insinööri Seppo Rämö.

Kaikkia työhön osallistuneita ja sitä matkan varrella kommentoineita kiitän mielenkiinnosta ja kaikesta avusta, jota olen saanut.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin vanhemmilleni kannustuksesta ja tuesta opintojeni aikana.

Espoossa, helmikuun 20. päivänä 2008

Essi Hartman

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
MERKINNÄT	7
1 JOHDANTO	10
2 PAALUUN KOHDISTUVAT KUORMITUKSET.....	12
3 SIVUKUORMITETUT PAALUT	15
3.1 SIVUKUORMA JA SIVUVASTUS	15
3.2 SIVUKUORMAN JA -VASTUKSEN SEKÄ SIIRTYMÄN MÄÄRITYS.....	18
3.2.1 Yksittäinen paalu.....	18
3.2.2 Paaluryhmä.....	22
4 MAANPAINEIDEN VAIKUTUS PAALURAKENTEISIIN	29
5 MAAPERÄN MALLINTAMINEN PLAXIKSELLA	34
6 TOUKORANNAN SUOJASEINÄ	37
6.1 KOHDE	37

6.2	MAAPERÄ.....	39
6.3	TUKIRAKENNE	42
6.3.1	Paalulaatta	42
6.3.2	Paalutukset	43
6.4	LASKELMAT	47
6.4.1	Laskennan lähtöoletukset	47
6.4.2	Laskennan lähtötiedot	48
6.4.3	Plaxis V8.6-laskelmien tulokset.....	54
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	61
	LÄHTEET	64
	LIITTEET.....	66

Merkinnät

a	paaluväli (m)
c	koheesio (kPa)
c'	tehokas koheesio (kPa)
d	paalun halkaisija tai sivun pituus (m)
D ^e	elastinen materiaaalimatriisi
E	kimmokerroin (kN/m ³)
e	paalun vapaa mitta (m)
EI	paalun taivutusjäykkyys (MNm ²)
f	paalun taipuvan osan pituus (m); myötöfunktio (FEM-menetelmässä)
H	vaakakuorma (kN; kN/m)
K	maanpaine kerroin
k	vedenläpäisevyys (m/päivä)
K ₀	lepopaine kerroin
K _a	aktiivinen maanpaine kerroin
K _p	passiivinen maanpaine kerroin
k _s	alustaluku (kN/m ³ ; MN/m ³)
m	moduuliluku
M	momentti (kNm; kNm/m)
n _h	alustalukukerroin
p ₀	lepopaine (kPa)
p _a	aktiivipaine (kPa)
p _h	sivuvastus (kPa)
p _k	sivukuorman (kPa)

p_m	sivuvastuksen murtoarvo (kPa)
p_p	passiivipaine (kPa)
s_u	suljettu leikkauslujuus (kN/m^2)
U_c	konsolidaatioaste
w	vesipitoisuus (%)
W_{el}	taivutusvastus (cm^3)
y	siirtymä (m)
z	syvyys (m)
β	jännityseksponentti
γ	tilavuuspaino (kN/m^3)
γ'	tehokas tilavuuspaino (kN/m^3)
ΔP	paaluryhmän yksittäiseen paaluun aiheutuva horisontaalinen kuorma (kPa)
Δp_{kok}	paaluryhmän yksittäiseen paaluun kohdistuva horisontaalinen kuorma (kPa)
ε	koordinaattiakselin suuntainen suhteellinen muodonmuutos
ε^e	elastinen muodonmuutos
ε^p	plastinen muodonmuutos
λ	plastisuuskerroin
ν	Poissonin luku
σ'_v	tehokas vallitseva jännitys (kPa)
σ'_{v0}	tehokas pystysuora jännitys (kPa)
σ_0	alkujännitys (kPa)
σ_p	esikuormitusjännitys (kPa)

σ_v	vallitseva jännitys (kPa)
$\sigma_{x,y,z}$	koordinaattiakselin suuntainen jännitys (kPa)
τ	leikkausjännitys (kPa)
φ	kitkakulma (°)
φ'	tehokas kitkakulma (°)
ψ	dilataatiokulma

1 Johdanto

Paaluperustusten suunnittelu lähtee yleisesti olettamuksesta, että niiden maaperään johtama kuorma tulee kohtisuoraan paalun akselia kohden. Useimmiten paaluun kuitenkin kohdistuu kuormituksia myös muista suunnista. Maaperä paalun ympärillä jatkaa elämäänsä paaluttamisen jälkeenkin. Paalutusalueen ympärillä tapahtuva liikenne sekä mahdolliset tulevat rakennukset aiheuttavat maan painumista ja jännitysten jakautumista myös paaluja ympäröivään maahan.

Sivukuormitusten suuruus ja niiden rasittavuus paaluille on riippuvainen maan sivuvastuksesta ja paalun kapasiteetista. Tukirakenteiden mitoituksessa otetaan huomioon sekä maamassoista aiheutuvat maanpaineet että maamassojen liikkeistä ja kuormista paaluihin muodostuvat sivukuormat ja paaluista maahan aiheutuva sivuvastus. Edellä mainittujen tekijöiden suuruus riippuu maalajista ja maan ominaisuuksista.

Erilaiset täytöt ja rakenneratkaisut muodostavat maanpaineen kannalta hyvinkin erilaisia olosuhteita maaperässä. Raskaat täytöt aiheuttavat perustuksille ongelmia, jotka voidaan ratkaista monin eri tavoin; joitakin ratkaisuja ovat esimerkiksi kevennykset, massanvaihdot, tukiseinät ja suojaavat paalurakenteet. Riippuen tulevan rakenteen koosta ja sen kantamista massoista, pyritään nämä kohdat huomioon ottaen etsimään edullisinta ratkaisua. Suuret massanvaihdot ja liian pieni maanpaineen vaikutusten arviointi voivat vaarantaa ympäröivät rakennukset ja rakenteet.

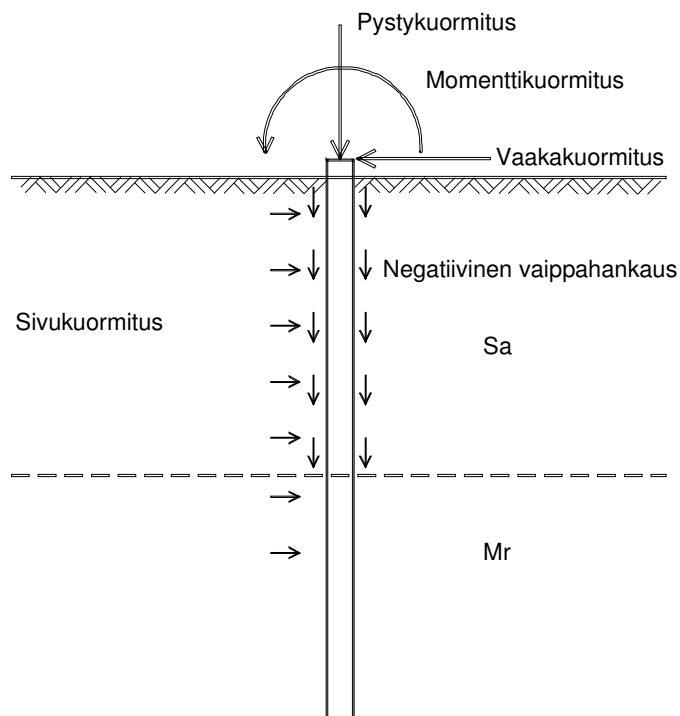
Tässä diplomityössä tutkitaan paaluun kohdistuvien sivukuormitusten vaikutusta paalun taipumaan, momenttiin ja kuormituksesta syntyvään vaakakuormaan. Maamassoista aiheutuvat kuormitukset syntyvät kaivantojen, pengerryksien ja maalausjien eri massojen eroavaisuuksista. Maaperän liikkeet aiheuttavat maan ”virtausta” paalun ympärillä, josta aiheutuu paaluun sivukuormitusta ja paalusta vuorostaan sivuvastusta maan virtausta vastaan. Sivukuormitusten ja sivuvastuksen jakautuminen sekä maanpaineen muodostuminen tapahtuvat hieman eri tavoilla lyhyiden

ja pitkien paalujen tapauksissa. Tässä diplomityössä painopiste on pitkien paalujen sivukuormituksen käsittelyssä. Laskelmien lähtökohtana on määrittää maaperän liikkeitä ja vaarallisimmat kohdat maaperässä.

Paaluun kohdistuvia kuormituksia voidaan laskea monilla eri menetelmillä ja kaavoilla, mutta kuhunkin käsiteltävään tilanteeseen tulisi valita menetelmä, joka soveltuu tilanteeseen parhaiten. Luvussa 3 ja 4 on esitelty yksinkertaisiin maaperäolosuhteisiin soveltuvia laskentamenetelmiä ja –kaavoja. Näitä ei kuitenkaan voi käyttää, jos maalajien kerrosrajat ovat jyrkkiä, eri maalajien parametrit vaihtuvat rajapinnoilla hyvinkin paljon tai kun maaperässä vallitsevat olosuhteet eivät ole homogeeniset. Näin ollen luvussa 6 on esitelty perinteisiä laskentakaavoja monimutkaisempi vaihtoehto laskennaksi, FEM-menetelmä Plaxis-ohjelmalla toteutettuna.

2 Paaluun kohdistuvat kuormitukset

Paalujen kannattamien rakenteiden lisäksi paaluun aiheutuu kuormituksia sitä ympäröivästä maaperästä ja vallitsevista olosuhteista (kuva 1). Tässä diplomityössä käsiteltävien suojaseinänä toimivien paalutusten periaatteena on ottaa vastaan maaperän liikkeitä ja muodonmuutoksista johtuvia sivukuormituksia ja vaakasuuntaisia siirtymiä. Suojaseinänä toimivat paalut mitoitetaan paaluun aiheutuvien vaakakuormien ja taivutusmomentin perusteella. Ajan myötä suojaseinään tulee muodonmuutoksia maamassojen liikkeestä. Muodonmuutosten suuruus riippuu suojaseinän kapasiteetista (paalun halkaisija, materiaali tms.).

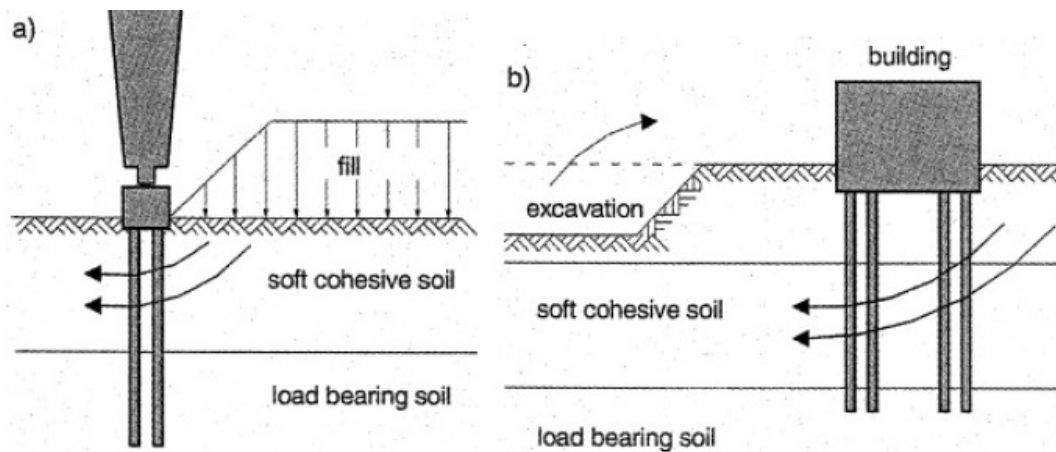


Kuva 1 Paaluun aiheutuvat ulkoiset kuormitukset (LPO-2005)

Paaluun voi aiheuttaa taivutusta ympärillä tai sivulla oleva toispuoleinen täyttö (kuva 2a), ulkopuolinen pakkovoima tai maan siirtymisestä aiheutuva maanpaine. Mm. seuraavat tekijät aiheuttavat paaluille taivutusrasituksia:

- kaivu paalutusalueella tai sen lähellä (kuva 2b)

- paalutusalueella liikkuvat työkoneet (esimerkiksi paalutuskoneet, kaivinkoneet ja nosturit)
- paalun suuntaisen kuorman epäkeskisyys
- maan painuminen vinopaalujen ympärillä
- paalun käyryys, jota erityisesti aiheuttavat:
 - paalujen käsittely työmaalla (varastointi ja pystyyn nosto)
 - epäkeskinen lyönti
 - lyönti paksun täyttökerroksen läpi, jossa on paalua käyristäviä kiviä ja lohkareita tai muita esteitä
 - moreenin yläosan lohkareet sekä
 - luistaminen vinolla kallionpinnalla (LPO-2005).



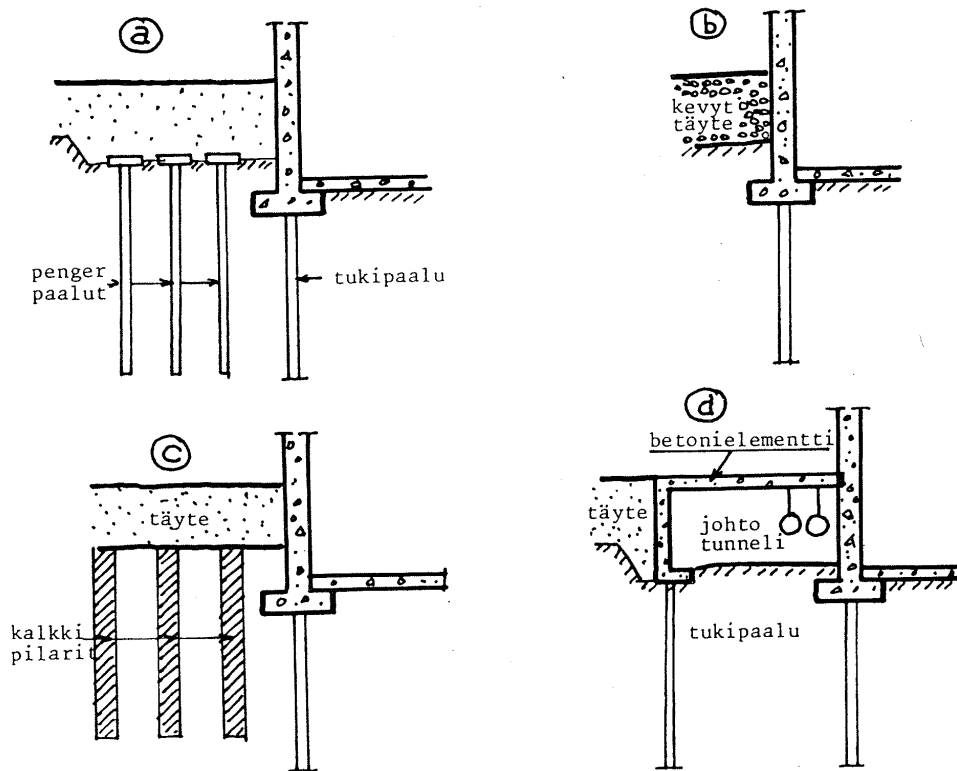
Kuva 2 a) Toispuoleisen täytön vaikutus paaluihin b) kaivannon sijoittuminen paaluperustusten sivulle (Kempfert et al., 2003)

Paalujen kiinnitys laattaan tai anturaan tapahtuu joko nivelellisesti tai jäykästi. Jäykästi kiinnittämällä paalujen sivukuormakapasiteetti on noin 50 % suurempi kuin nivelkiinnityksellä, jolloin saadaan vähennettyä paalun siirtymiä. Jäykkää kiinnitystä on suositeltavaa käyttää, kun paalut ovat lyhyitä tai niiden otaksutaan saavan suuria taivutuksia. (Slunga et al., 1986)

Suojaseinämien käyttö paalutuksia ja muita pohjarakenteita suojelemaan tulee kysymykseen, kun massanvaihto, tukipaalaus, pengerpaalaus tai muu kuormitus- ta keventävä rakennelma (kuva 3) ei ole tarpeeksi tehokas ja/tai taloudellinen koh-

teessa. Suojaseinämä ei välttämättä ole osa pohjarakenteen kantavaa osaa vaan sen tarkoitus on pääasiassa ottaa vastaa sivukuormituksia muualta maaperästä.

Suojaseinänä voidaan käyttää paaluja tietyin välimatkoin, ponttiseiniä tai muita tukiseinärakenteita. Suojaseinän periaatteena on ottaa vastaan kuormitukset ja johtaa ne sen omiin muodonmuutoksiin ja taivutusvastukseen estäen näin varsinnaisten perustusten vahingoittuminen.

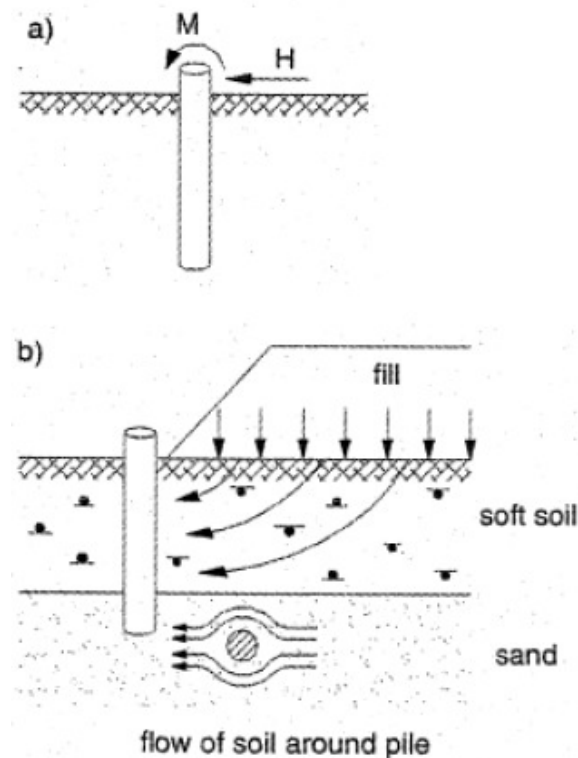


Kuva 3 Paaluperustuksen ja sen ympäristön vahinkojen torjuminen: a) pengerpaalutus, b) täytön kevennys, c) maaperän lujittaminen esim. kalkkipilareilla ja d) perustuksen vierustan kuormitusvähennys betonielementillä (Rantamäki & Tamminen, 1979).

3 Sivukuormitetut paalut

3.1 Sivukuorma ja sivuvastus

Paaluun aiheutuvat sivukuormitukset voidaan jakaa aktiiviseen ja passiiviseen kuormaan (kuva 4). Aktiivinen kuorma johtuu paalun yläpäähän aiheutuvasta sivukuormituksesta (kuva 4a), kun taas passiivinen kuormitus voi johtua esimerkiksi maan liikkeistä paalun ympärillä tai sivulla aiheutuen paalun varteen (kuva 4b). Paaluun vaikuttava passiivinen sivukuormaa voidaan kuvata "virtauksena" eli paalua ympäröivän maan liikkeenä. Vaakakuormituksen suuruus riippuu myös kuormituslähteen etäisyydestä. (Kempfert et al, 2003)



Kuva 4 a) Aktiivinen kuorma (momentti ja voima suoraan paalun yläpäähän) b) Passiivinen kuorma (kuormitus paalun koko pituuteen, esim. täytön tai kaivannon vaikutus) (Kempfert et al, 2003)

Paaluun maan liikkeistä johtuvat voimat voidaan jakaa sivukuormaan ja sivuvastukseen. Maan siirtyessä paalua vasten on kyse sivukuormasta ja paalun siirtyessä maata vasten sivuvastuksesta. Sivukuorman suuruus määräytyy suoraan paalun halkaisijan d ja maan suljetun leikkauslujuuden s_u mukaan. Paaluun maasta aiheutuva sivuvastus aiheuttaa sen, että paalu voi sen avulla ottaa vastaan siihen kohdistuvia pieniä ulkoisia sivusuuntaisia pakkovoimia (Rantamäki & Tammirinne, 1979). Paalujen rakenteellisessa mitoituksessa on tällöin syytä ottaa huomioon, että ne kestävät paalun suuntaisten kuormien kanssa yhtäaikaaisesti kaikki käyryydestä ja taivutusrasituksista sekä myös paalun mahdollisesta momenttikuormituksesta aiheutuvan taivutusrasituksen. Kun arvioidaan paaluperustuksen vaakasiirtymiä, seuraavat seikat tulee ottaa huomioon:

- maan jäykkyys
- yksittäisten paalujen taivutusjäykkyys
- paalun ja rakenteen välisen liitoksen momenttijäykkyys
- ryhmävaikutus
- kuormituksen suunnan muutokset tai syklisen kuorman vaikutukset
- siirtymistä aiheutuvat rakenteen kiertymät ja kaltevuuden muutokset.

(LPO-2005)

Suuri sivukuormitus aiheuttaa lisäkuormitusta paalujen ympärillä sijaitsevaan maapohjaan. Kasvaessaan tarpeeksi suureksi, kuormitus aiheuttaa murren. Murren syntyvä liukupinta tuo sivukuormitusta paalutuksille aiheuttaen paaluille taivutusta ja paalut murtuvat. Pelkkä paalujen nurjahdustarkastelu ei ota huomioon näitä ylimääräisiä kuormituksia, joten paaluille tulee tehdä suojaava rakenne tai ne mitoitetaan suoraan myös sivulta tulevalle kuormalle. Taloudelliselta kannalta voi suojaseinärakenne tulla edullisemmaksi kuin rakentaa koko paalutus kapasiteetiltaan sivukuormaa paremmin kestävästä paaluista.

Tässä työssä käsitellään suojaseinärakennetta sivukuormitusten vähentämisessä. Esimerkkinä käytetään tapausta, jossa paalutettavan, pehmeästä savesta koostuvan alueen vieressä on epävakaata louhepengerrys. Suojaseinäenä käytetään RR711-

paaluja (normaali paalutus koostuu RR220- ja 300x300-paaluista). Suojapaaluilla otetaan vastaan painavan louhepenkereen sivukuormitusta ja muodonmuutokset kohdistetaan suojaaviin paaluihin. Suojapaalut estävät louhepenkereen liikkeitä ja painumista savimaahan paalujen välissä.

Sivukuormalle ja sivuvastukselle seuraavassa kohdassa esitetyt laskentakaavat ovat käyttökelpoisia, kun laskennan kohteen maaperä on tarpeeksi yksinkertainen koostumukseltaan. Kuitenkin, jos maaperä on hyvin sekalaista ja maakerrosten rajat monimutkaisia, täytyy laskennassa pohtia monimutkaisempien menetelmien käyttöä. Luvussa 5 on kerrottu vaihtoehtoisena laskentatapana FEM-laskennasta Plaxis-ohjelmalla. FEM-laskennalla voidaan ottaa huomioon monimutkaisemmat maaperämallit ja määrittää niiden toimintaa tarkemmin kuin perinteisillä laskentakaavoilla. Tässä diplomityössä maaperän sivukuormituksen vaikutuksia tutkittiin Plaxis-ohjelman avulla.

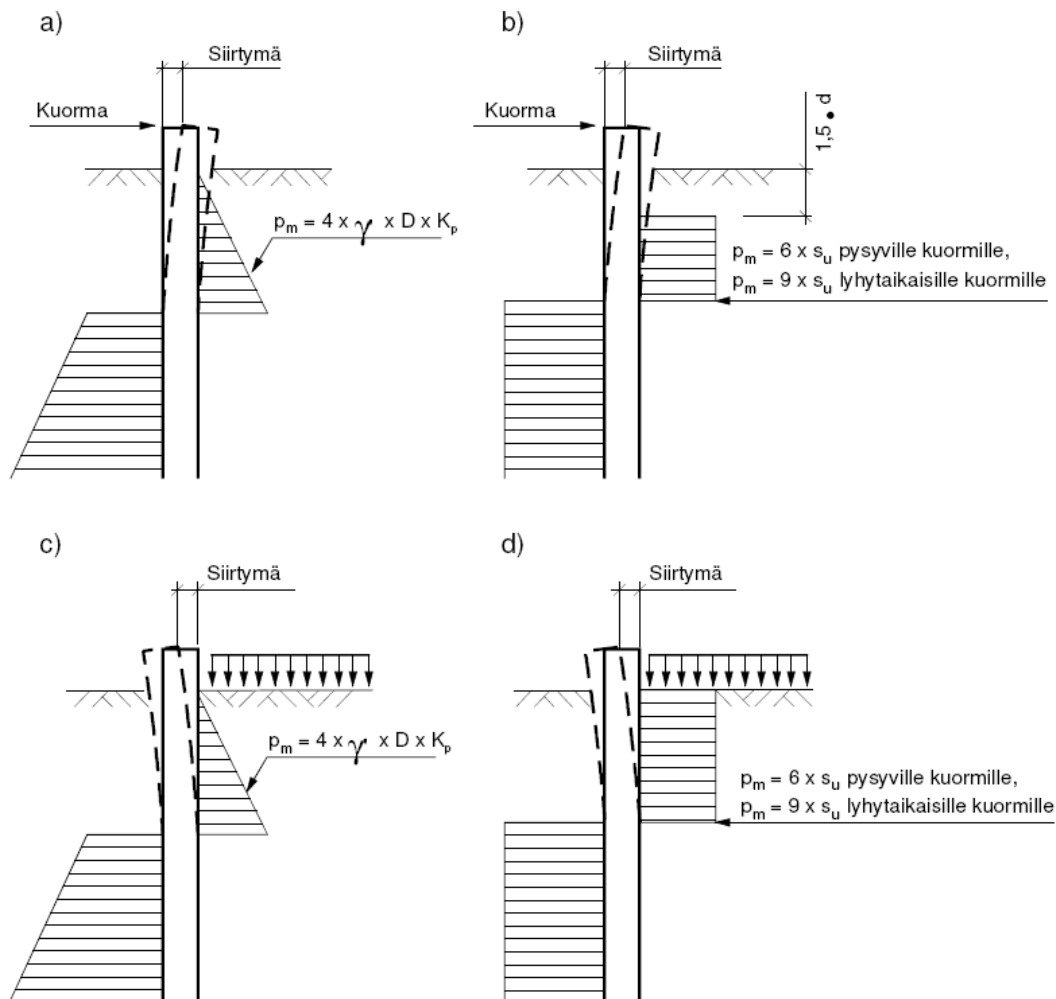
3.2 Sivukuorman ja -vastuksen sekä siirtymän määrittäminen

3.2.1 Yksittäinen paalu

Yksittäisen paalun sivukuorma ja sivuvastus voidaan määrittää alustalukumenetelmällä (Winklerin menetelmä), tällöin paalua voidaan käsitellä elastisena palkkina. Paalun siirtymä ja taipuma ovat riippuvaisia paalun taivutusjäykkyydestä EI , joka taas on riippuvainen paalun materiaalista sekä halkaisijasta. Sivukuormalaskelmien tavoitteena on näin ollen määrittää oikeanlainen paalu tarpeisiin nähden sekä sen vastaanottamien muodonmuutosten suuruus. (Kempfert et al, 2003)

Kuvasta 5 nähdään sivuvastuksen ja sivukuorman muodostuminen karkearakeisessa (a, c) ja hienorakeisessa (b, d) maassa. Sivukuormitusta aiheuttaa kuvan 5 tapauksissa c ja d maanpäällinen, horisontaalinen kuorma, joka vaikuttaa paaluun vertikaalisesti.

Koheesiomaassa paalun sivuvastus ja -kuorma saadaan maan leikkauslujuuden perusteella ja se on riippuvainen kuormituksen pituudesta. Kitkamaassa sivuvastuksen ja -kuorman suuruus on taas riippuvainen maan tilavuuspainosta, paalun halkaisijasta ja passiivipainekertoimesta. Koheesiomaassa sivuvastus alkaa vaikuttaa paaluun syvyydellä 1,5 kertaa paalun halkaisija, kitkamaassa puolestaan heti maanpinnasta kasvaen syvyyden mukana. Koheesiomaassa sivuvastuksen ja sivukuormituksen suuruus on riippuvainen myös kuorman kestosta (lyhytaikaisille kuormille murtoarvot ovat suuremmat).



Kuva 5 Sivuvastuksen murtoarvot p_m (ominaisarvot) jäykälle paalulle; a) karkearakeisessa maassa, b) hienorakeisessa maassa ja sivukuormituksen murtoarvot jäykälle paalulle; c) karkearakeisessa maassa, d) hienorakeisessa maassa (LPO-2005)

D	syvyys maanpinnasta z (m)
d	paalun halkaisija tai sivun pituus (m)
K_p	passiivinen maanpaine kerroin
γ'	tehokas tilavuuspaino (kN/m^3)
s_u	suljettu leikkauslujuus (kN/m^2)

Taivutusjäykkyyden ja sivuvastuksen välistä riippuvuutta voidaan havainnollistaa seuraavalla yhtälöllä. Tämä kaava olettaa, että paalu toimii elastisen palkin tavoin, kun on kyse sivuvastuksen määrittämisestä.

$$EI \frac{d^4 y(z)}{dz^4} + p_h(z)d = 0 \quad (1)$$

EI	paalun taivutusjäykkyys
y	paalun siirtymä (m)
z	syvyys maanpinnasta (m)
p_h	sivuvastus
d	paalun halkaisija

Siirtymän ja sivuvastuksen välille on johdettu yhtälö (2). Yhtälön määritelmä näkyy kuvan 6b oikeanpuoleisessa koordinaatistossa.

$$p_h = k_s y \quad (2)$$

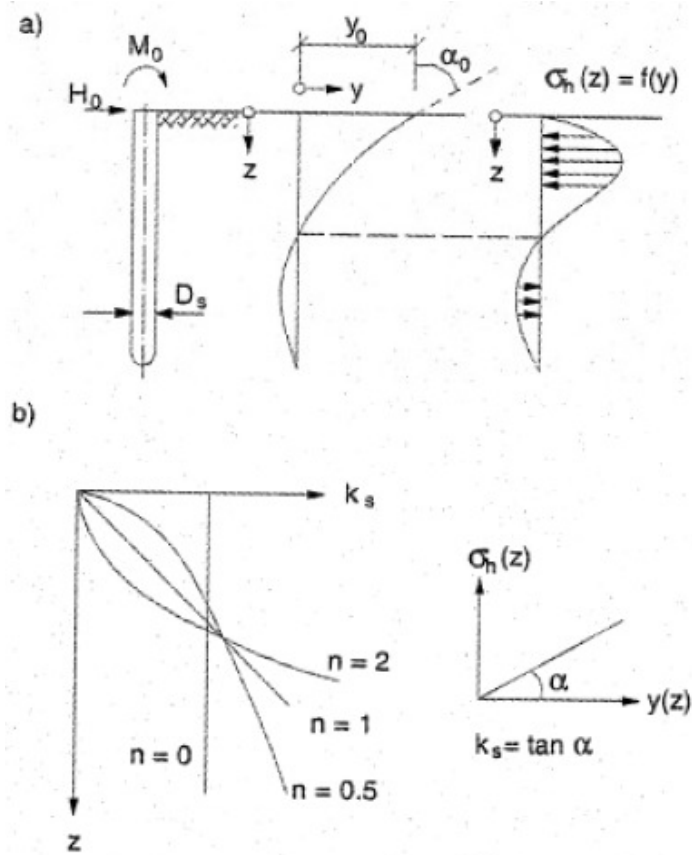
k_s	alustaluku (kN/m ³ ; MN/m ³)
-------	---

Alustaluvun jakautumisen määrittämiseen maaperässä voidaan käyttää yhtälöä (3), jonka määritelmä näkyy kuvan 6b vasemmanpuoleisessa koordinaatistossa. Alustaluku on riippuvainen syvyydestä ja paalun halkaisijasta. Haittapuolena alustalukumenetelmällä laskettaessa on se, että sillä ei pystytä ottamaan huomioon maan leikkauslujuutta. (Kempfert et al, 2003)

$$k_s = n_h \left(\frac{z}{d} \right)^n \quad (3)$$

n_h	vaakasuuntainen alustalukukerroin
n	$n = 0,25 \dots 5$

Sivuvastus jakautuu paalua vasten kuvan 6a mukaisesti. Vaakavoima aiheuttaa sen, että sivuvastus kasvaa siirtymien kasvaessa paalun yläpäässä. Kun siirtymiä ei tapahdu, ei paaluun myöskään aiheudu sivuvastusta. Kuvassa 6b näkyy alustaluvun k_s määritelmä kaavojen (2) ja (3) mukaan. Koordinaatistossa (k_s, z) määritellään kaavan (3) eksponentti n ja koordinaatistossa (y, σ_h) alustaluku k_s on siirtymän ja sivuvastuksen välisen suoran kulmakerroin.



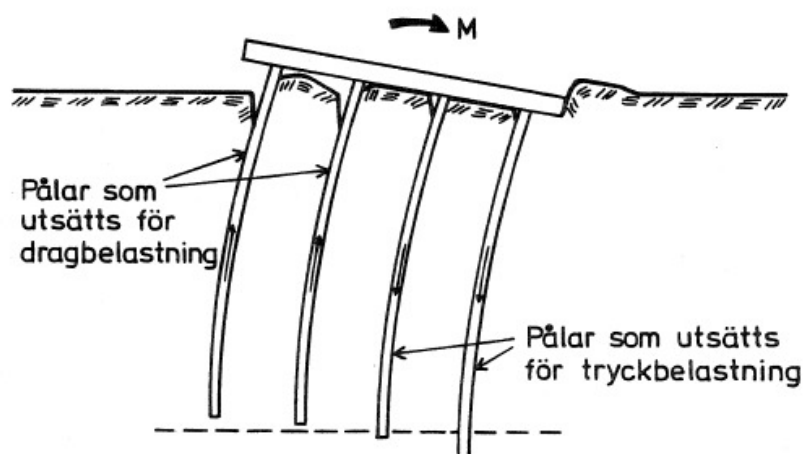
Kuva 6 Alustalukumenetelmä. a) Paalun siirtymän y_0 ja sivuvastuksen p_h jakautuminen, kun paalun yläpäähän kohdistuu vaakakuorma H_0 ja momentti M_0 . b) Alustaluvun k_s määritelmä (Kempfert et al, 2003)

D_s	paalun halkaisija tai sivun pituus d (m)
σ_h	sivuvastus p_h (kPa)

3.2.2 Paaluryhmä

Paaluryhmässä paalujen yhteisvaikutus sivukuorman jakaumaan aiheuttaa sen, että yksittäisen paalun saama kuormitus riippuu siitä, missä kohtaa paaluryhmää se sijaitsee. Paalut, jotka sijaitsevat paaluryhmän reunoilla ja kulmissa, saavat suuremman kuormituksen kuin paalut, jotka sijaitsevat paaluryhmän keskellä. Keskellä sijaitsevat paalut ovat reunapaalujen suojeltavissa ja näin ollen reunapaaluihin muodostuu muodonmuutoksia ja taivutusta enemmän kuin sisäpuolisiin paaluihin. Toisaalta paalujen yläpäihin muodostuu (jos ne ovat kiinni samassa laatassa tai anturassa) lähes yhtä suuri horisontaalinen siirtymä, vaikka paalujen varsiin kohdistuvat eri kuormat. (Kempfert et al, 2003)

Kuvasta 7 nähdään paaluryhmän paaluihin vaikuttavat voimat, kun ryhmään vaikuttaa tietyn suuruinen momentti. Osaan paaluista aiheutuu vetorasituksia momentin kiertosuuntaan päin ja osaan puristusrasitusta momentin vaikutuksesta (tai epäkeskisen kuorman painaessa niitä) (Olsson, Holm, 1993). Epäkeskisen kuorman aiheuttama momentti voidaan pienentää sijoittamalla kuorman alle kapasiteetiltään suurempia paaluja, jotka estävät momenttia syntymästä ja vähentävät vetoa muualla sijaitsevista paaluista.

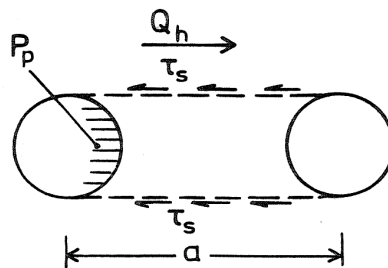


Kuva 7 Sivukuorman vaikutus paaluryhmään (vasemmalla vetorasitusta ja oikealla puristusrasitusta) (Olsson, Holm, 1993)

Paaluryhmän sivukuormituksen vähentämisen kannalta on reunapaaluilla suuri merkitys. Paaluryhmän sivustoille oleviin paaluihin kohdistuu suurempi kuormitus kuin niiden suojaamiin paaluihin. Reunapaaluiksi voidaan tällöin valita kapasiteetiltaan vahvempia paaluja kuin muualle paalutettavalle alueelle.

Maan sivuvastus paaluryhmän tapauksessa määritetään joko paaluryhmän yksittäisten paalujen sivuvastusten summana tai paalujen muodostaman ryhmän sivuvastuksena, jolloin oletetaan ryhmä yhtenäiseksi perustukseksi. Näistä raja-arvoista pienempi on paaluryhmään kohdistuva maan sivuvastus. (LPO-2005)

Paaluryhmän murtuminen vaatii ryhmän paalujen murtumista yhteistoimintana. Koko ryhmän murtumiseen vaikuttaa suuresti paalujen keskinäinen välimatka (kuva 8). Kuvan 8 mukainen paaluryhmän murtuminen tapahtuu koheesiomaassa, kitkamaan tapauksessa murtuminen tapahtuu kaavan (4) toteutuessa. Tällöin määrittävä parametri on kitkakulma ϕ' , kun se koheesiomaan tapauksessa on suljettu leikkauslujuus s_u .



Kuva 8 Vaakakuormitetun paalutuksen murtuminen paaluryhmänä koheesiomaassa (sivuvastuksen ollessa $9 \cdot s_u \cdot d$ yksittäiselle paalulle), kun paaluväli a on vähemmän kuin 4,5 kertaa paalun halkaisija (Olsson, Holm, 1993).

a	paaluväli (m)
τ_s	leikkausjännitys (kPa)
Q_h	vaakakuorma H (kN)
p_p	sivuvastus p_h (kPa)

d *paalun halkaisija tai sivun pituus (m)*

Kaukana toisistaan sijaitsevat paalut eivät vaikuta toisiinsa riittävästi murtaakseen toisen. Yhden paalun murtuminen tosin lisää sivukuormitusta muille paaluryhmän paaluille. Lähellä toisiaan sijaitsevat paalut puolestaan aiheuttavat murtuessaan suurempia rasituksia viereisiin paaluihin, jolloin paaluryhmän murtuminen kokonaisuudessaan on helpompaa.

Kuvassa 8 kuvataan paaluryhmän murtumiseen johtavaa tilannetta koheesiomaassa, paalujen murtuminen paaluryhmänä kitkamaassa puolestaan tapahtuu, kun seuraava yhtälö toteutuu:

$$\frac{a}{d} < \frac{K_p^2}{2K \cdot \tan \varphi'} \quad (4)$$

a paaluväli (m)

K maanpaine kerroin (K saa arvon passiivisen maanpaine kertoimen K_p ja lepopaine kertoimen K_0 väliltä. Koska jännitysalueet vaihtelevat suuresti paalujen välissä maassa, on K :n arvon päättäminen vaikeaa. Hyvä keskimääräinen arvo K :lle on 1,0.)

φ' tehokas kitkakulma (°) (Olsson, Holm, 1993)

Yhtälö (4) toteutuu tavallisimmilla paaluväleillä, joilla toteutuu myös yhtälö (5). Yhtälöstä (5) saadaan suurin syntyvä vastus kitkamaassa yhden paalun taakse sijoitetussa paalussa. (Olsson, Holm, 1993)

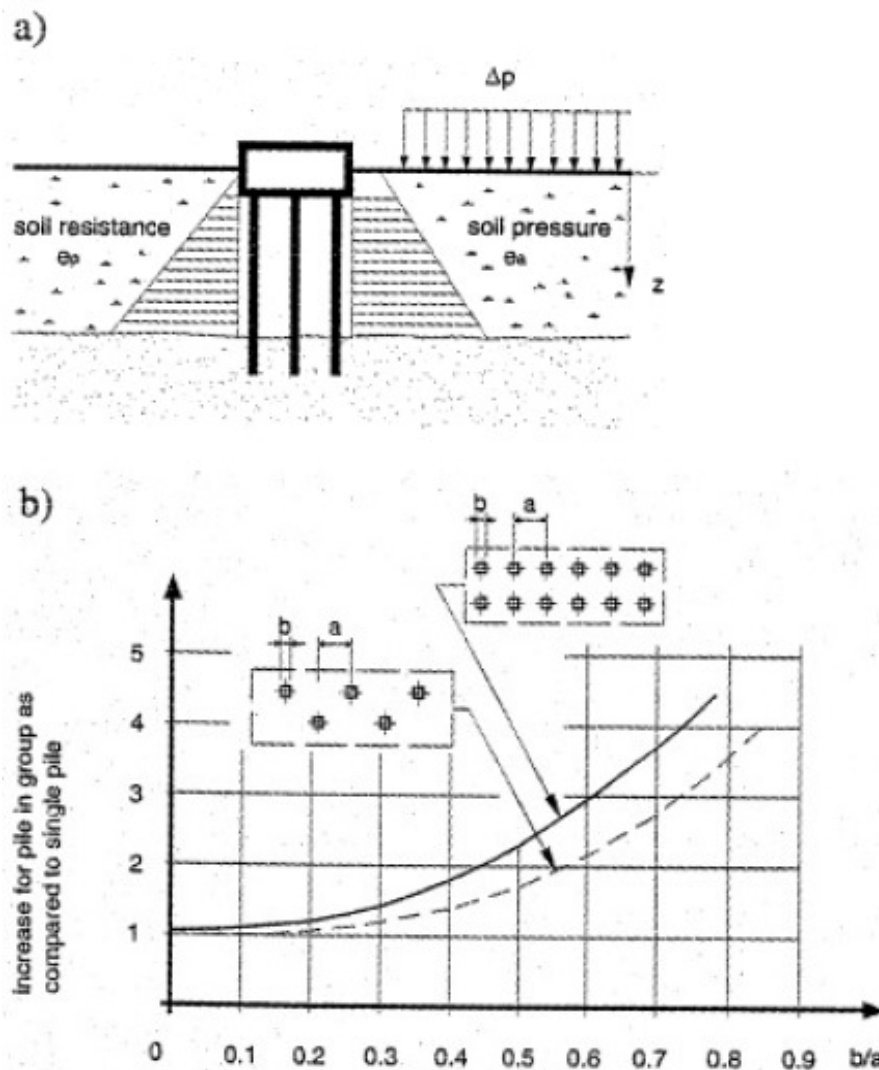
$$p_h = 2K \cdot \sigma'_0 \cdot \tan \varphi' \cdot a \quad (5)$$

p_h sivuvastus

σ'_0 alkujännitys (kPa)

Yllä mainituilla yhtälöillä käsitellään paaluryhmän murtumista kokonaisena kapaleena sekä siihen johtavia ehtoja. Seuraavassa on käsitelty paaluryhmään kohdistuvan vaakasuoran kuorman (ulkoinen paalun tai paaluryhmän yläpäähän kohdistuva kuorma tai maanpaineesta aiheutuva paalujen varteen kohdistuva vaakakuorma) jakautumista yksittäisille paaluille.

Sivukuormituksen suuruus paaluryhmässä riippuu paalujen välisestä etäisyydestä. Yhteen paaluun kohdistuva kuormitus tulee viereisten paalujen välisen etäisyyden leveydeltä. Kuvassa 9a kuvataan maan virtauspaineen muodostumista paaluryhmään ulkoisen maanpäällisen kuormituksen vaikutuksesta. Paaluryhmän vasemmalle puolelle muodostuu kuvan 9a tapauksessa sivuvastusta ja oikealle puolelle sivukuormitusta.



Kuva 9 a) Sivuvastuksen ja sivukuorman muodostuminen ulkoisen kuorman vaikutuksesta. b) Paaluryhmän vaikutus yksittäiseen paaluun kohdistuvan sivukuormituksen suuruuteen. Kuvan merkinnät:

Δp	kuorma q (kN)
e_p	sivuvastus p_h (kPa)
e_a	sivukuorma p_k (kPa)
z	syvyys maanpinnasta (m)
b	paalun halkaisija D_s (m)
a	kuormitusleveys, joka on pienin seuraavista:

- paaluväli,
- kolme kertaa paalun halkaisija,
- koheesiomaakerroksen paksuus tai
- paaluryhmän kokonaisleveys jaettuna paalumäärällä (Kempfert et al, 2003)

Kuvan 9b perusteella voidaan määrittää yhtälö paaluryhmän yksittäiseen paaluun kohdistuvalle horisontaaliselle kuormalle:

$$\Delta p_{kok} = p_k - p_h \quad (6)$$

$$p_k = \gamma z + q - 2s_u, \text{ jos } s_u \text{ on käytössä}$$

$$p_k = \gamma K_a + q - 2c' \sqrt{K_a}, \text{ jos } c' \text{ ja } \varphi' \text{ ovat käytössä}$$

$$p_k = \gamma K_a + U_c q K_a + (1 - U_c) q - 2c' \sqrt{K_a} \quad \text{osittaiselle konsolidaatiolle}$$

$$p_h = \gamma K_p, \text{ jossa } K_p=1,0 \text{ (Kempfert et al, 2003)}$$

p_k	sivuvastus (kPa)
p_h	sivukuorman (kPa)
γ	tilavuuspaino (kN/m ³)
s_u	suljettu leikkauslujuus (kN/m ²)
c'	tehokas koheesio (kPa)
φ'	tehokas kitkakulma (°)
K_a	aktiivinen maanpaine kerroin
K_p	passiivinen maanpaine kerroin
U_c	konsolidaatioaste

Kaavan (6) muuttujista löytyvän aktiivisen maanpaine kertoimen K_a kaava on seuraavanlainen:

$$K_a = \frac{1}{K_p} = \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \quad (7)$$

Yhtälön (6) ja kuvan 9b perusteella saadaan paaluryhmän yksittäiseen paaluun aiheutuvan horisontaalisen kuorman suuruus kaavalla (8) (Kempfert et al, 2003).

$$\Delta P = \Delta p_{kok} \cdot a \quad (8)$$

4 Maanpaineiden vaikutus paalurakenteisiin

Tukirakenteet mitoitetaan siten, että ne kestävät maanpaineesta aiheutuvat rasitukset. Maanpaineen suuruudella ja jakautumisella on siten suuri vaikutus rakenteiden mitoittamiseen. Maamassojen liikkeet ja muodonmuutokset vaikuttavat ratkaisevasti maanpaineen suuruuteen ja tätä kautta tukirakenteen oikeaan mitoittamiseen. Kun maanpainetta määritetään, oletetaan yleensä, että maamassan leikkajuuus on täysin kehittynyt. (Helenelund, 1956)

Maanpaine tarkoittaa maamassan aiheuttamaa kosketuspainetta rakennetta vasten. Rakenne voi olla tukiseinä, tukimuuri tai muu maamassaa vastaan oleva rakenne, pystysuora tai kalteva. Maanpaineen suuruus, suunta ja jakautuminen riippuvat tukirakenteen liikkeiden aiheuttamasta maamassan tiivistymisestä tai löyhtymisestä sekä maan lujuudesta, ulkoisista kuormituksista, pohjaolosuhteista ja maaperäolosuhteista.

Maanpaineen kuormittavan rakenteen liikkeiden perusteella maanpaine jaetaan lepo- (p_0), aktiivi- (p_a) ja passiivimaanpaineisiin (p_p) (Avellan, Tornivaara-Ruikka, 1990). Muutokset maanpaineessa voivat johtua esimerkiksi maamassan liikkeistä, maan muodonmuutoksista (painumat, tiivistyminen, löyhtyminen), maan poistosta tai lisäämisestä (massanvaihto, kaivanto) tai kuorman lisäämisestä.

Maanpaine muuttuu paalutuksen myötä paineolosuhteiden vaihdellessa. Paalutettaessa maamassan lepotila häiriintyy vain paalun välittömässä läheisyydessä. Tapauksessa, jossa maa murtuu vaikuttaa siinä aktiivi- ja passiivimaanpaine.

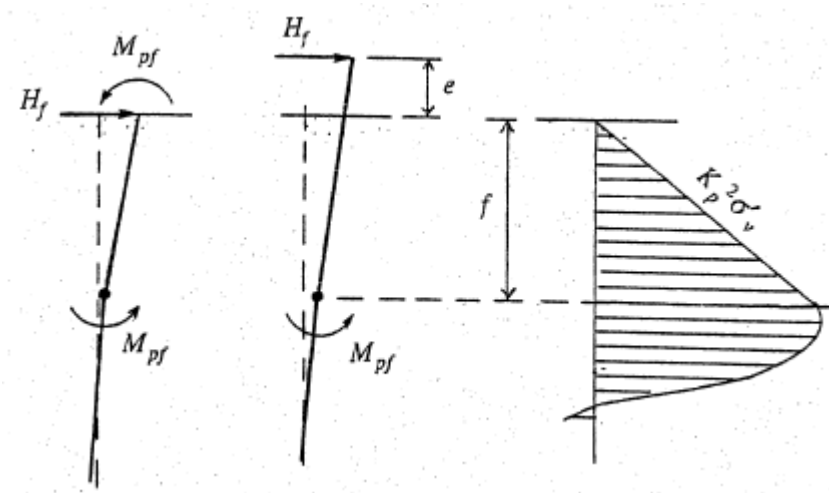
Aktiivinen maanpaine muodostuu maan siirtymisestä tukimuuria päin eli maan löyhtyessä. Passiivinen maanpaine puolestaan syntyy, kun maamassaa puristetaan eli tukiseinä liikkuu maamassaa kohden. Aktiivinen maanpaine on näin määriteltynä myötäävä voima ja passiivinen maanpaine vastustava voima. Aktiivipaine on pienempi kuin lepopaine. Passiivinen maanpaine on suurempi kuin lepo- ja aktii-

vipaine. Lepopaine syntyy siirtymätöntä rakennetta tai maamassaa vastaan. Se kehittyy pohjarakenteissa ajan kuluessa.

Maanpaineen jakautuminen ja suuruus paalua vasten riippuu siitä, missä maassa perustaminen tapahtuu. Kuvissa 10 ja 11 näkyy maanpaineen jakautuminen vaakakuorman vaikutuksesta kitka- ja koheesiomaassa. Maanpaine kitkamaassa kasvaa aina syvyyteen f (kohta, jossa paalu murtuu taipumisen johdosta: nivel paalus-
sa) saakka, josta se pienenee saavuttaen lopulta nollapisteen (Hansbo, 1994). Koheesiomaassa maanpaine pysyy samansuuruisena alkaen 1,5 kertaa paalun halkaisijan verran maanpinnan alapuolelta ja alkaen pienentyä syvyyden f jälkeen.

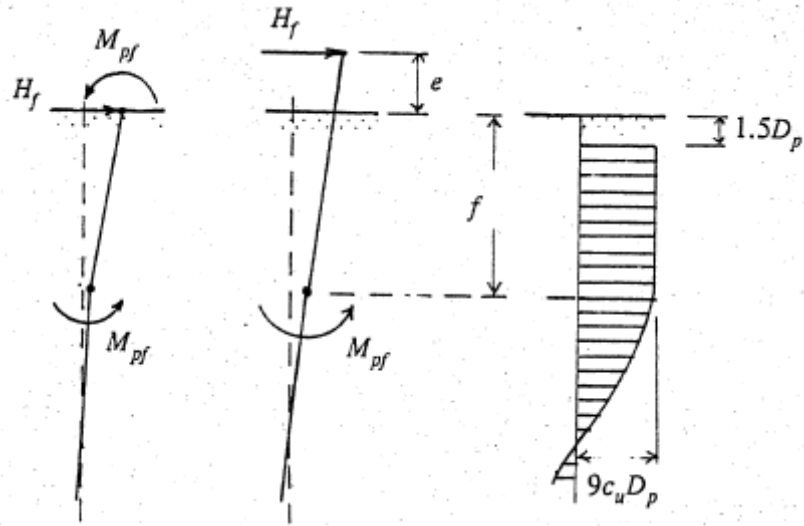
Vaakakuorman aiheuttaman maanpaineen jakautuma paalua vasten on riippuvainen vaakakuorman suuruudesta ja sen resultantin paikasta. Sivukuormituksen ja sivuvastuksen suuruuteen vaikuttavat kitkamaassa kuvan 10 mukaisesti passiivinen maanpaine paalun yläpäässä. Maanpaineesta tulee passiivinen paalun yläpäähän siirtymän johdosta. Passiiviselle maanpaineekertoimelle pätee kaava (9).

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \quad (9)$$



Kuva 10 Maanpaineen jakautuminen vaakakuorman vaikutuksesta pitkää paalua vasten kitkamaassa (Hansbo, 1994).

H_f	vaakakuorma H (kN)
M_{pf}	paalun momentti M (kNm)
e	paalun vapaa pituus (m)
f	paalun taipuvan osan pituus (m)
σ'_v	tehokas vallitseva jännitys (kPa)



Kuva 11 Maanpaineen jakautuminen vaakakuorman vaikutuksesta pitkää paalua vasten koheesiomaassa (Hansbo, 1994).

D_p	paalun halkaisija tai sivun pituus d (m)
c_u	suljettu leikkauslujuus s_u (kN/m ³)

Lepopaineen määritelmän mukaan maamassa on siirtymätöntä, ja olettamalla se isotrooppiseksi, voidaan käyttää Hooken lakia lepopaineen laskentakaavan määrittämiseksi:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_y + \sigma_x) \} \quad (10)$$

ε	koordinaattiakselin suuntainen suhteellinen muodonmuutos
---------------	--

E	kimmokerroin (kN/m ³)
σ	koordinaattiakselin suuntainen jännitys (kPa)
ν	Poissonin luku

johon sijoittamalla kaavat (11) ja (12)

$$\sigma_z = \sigma'_{v0} = \gamma' z \quad (11)$$

σ'_{v0}	tehokas pystysuora jännitys (kPa)
γ'	tehokas tilavuuspaino (kN/m ²)

$$\sigma_x = \sigma_y = p_0 \quad (12)$$

saadaan lepopaineen p_0 suuruus kaavamuodossa

$$p_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{v0} = K_0 \sigma'_{v0} \quad (13)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \text{ (maanpinnan ollessa vaakasuora)}$$

(Avellan, Tornivaara-Ruikka, 1990).

Kaavasta (13) voidaan nähdä, että lepopaineen suuruus on suoraan riippuvainen lepopaine kertoimesta K_0 ja tehokkaasta vallitsevasta jännityksestä σ'_{v0} .

Tukiseinät ja –muurit voivat lepopaineen vallitessa sortua esimerkiksi pohjamaan murtuessa tai rakenteen kaatuessa (kiertymä alapään ympäri), rakenteiden liukuesssa (yhdensuuntaissiirtymä), kokonaisstabiliteetin murtuessa (kiertymä yläpään ympäri) tai edellä mainittujen yhdistyessä (Avellan, Tornivaara-Ruikka, 1990).

Suojaseinään vaikuttaa lepopaine silloin, kun sitä ympäröivät maamassat ovat paikoillaan. Jos seinä liikkuu, vaikuttaa raskaamman maamassan puolella aktiivi-

nen maanpaine ja kevyemmän maamassan puolella passiivinen maanpaine. Näiden tasoittuessa maamassan liikkeet loppuvat ja vaikuttava maanpaine on jälleen lepopainetta.

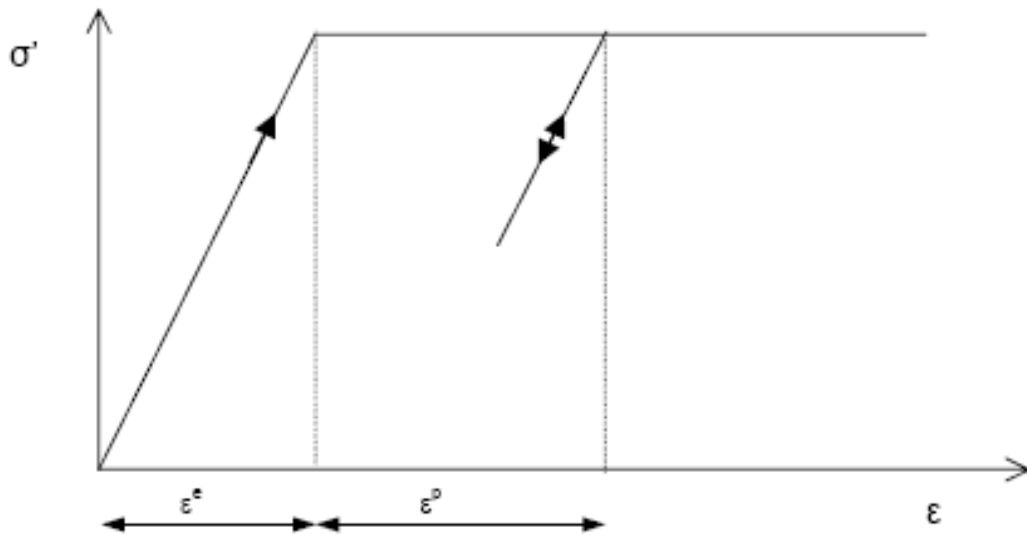
5 Maaperän mallintaminen Plaxiksella

Hyvin monimutkaisia ja monia muuttujia sisältäviä geoteknisiä tehtäviä laskettaessa FEM-laskenta on hyvä apuväline, mutta sitä ei kannata käyttää, jos laskenta-tehtävä on pieni tai geometrialtaan yksinkertainen.

FEM-menetelmällä laskettaessa edellytetään, että pohjasuhde-, materiaali- ja kuormitustiedot ovat hyvin selvillä. Maalajien mallinnus tapahtuu materiaalimallien avulla, jotka määrittävät laskentamallin elementtiverkon toimintaa. Etenkin kun maaperän toiminnasta halutaan mahdollisimman tarkka kuva, on FEM-menetelmällä laskemisesta hyötyä. FEM-menetelmällä voidaan mallintaa materiaalin käyttäytymistä elasto-plastisesti ja mallinnettava tehtävä voi yhtä hyvin olla aksiaalisesti symmetrinen kuin epäsymmetrinenkin. (Olsson, 1993)

Plaxis-ohjelma tukee useita erilaisia materiaalimalleja, joilla simuloida maan ja muiden materiaalien toimintaa. Tässä työssä mallintamiseen käytettiin rakenteiden osalta lineaarisesti elastista materiaalimallia ja maalajien osalta Mohr-Coulombin mallia. Lineaarisesti elastisella mallilla mallinnetaan yleisimmin maassa olevia rakenteita, kuten paalurakenteita, tukiseinät tms. Mohr-Coulombin mallia voidaan käyttää kaikille maalajeille joka tilanteessa yleisesti ensiarvion tekemiseen.

Mohr-Coulombin malli on lineaarisesti elasto-plastinen materiaalmalli (kuva 12). Mallin määrittävät parametrit Plaxiksessa ovat kimmomoduuli E , Poissonin luku ν , koheesio c , kitkakulma ϕ ja dilataatiokulma ψ . Koheesiosta ja kitkakulmasta käytetään niiden tehokkaita arvoja. Koheesioparametrilla voidaan myös mallintaa suljettua leikkauslujuutta s_u . Kimmomoduulia ja Poissonin lukua käytetään elastisuuden mallintamisessa ja kitkakulmaa ja koheesiota maan plastisuuden mallintamisessa. Jokaiselle maakerrokselle arvioidaan keskimääräinen jäykkyys, joka on siinä kerroksessa vakio. (Plaxis, 2005)



Kuva 12 Elasto-plastisen materiaalmallin mukainen jännitysten ja muodonmuutosten kulku (Plaxis, 2005)

Elasto-plastisen mallintamisen peruseriaate on, että muodonmuutokset koostuvat elastisesta ja plastisesta muodonmuutoksesta (kuva 12), jotka summattuna antavat kokonaismuodonmuutoksen kaavan (14) mukaisesti. (Plaxis, 2005).

$$\underline{\dot{\epsilon}} = \underline{\dot{\epsilon}}^e + \underline{\dot{\epsilon}}^p \quad (14)$$

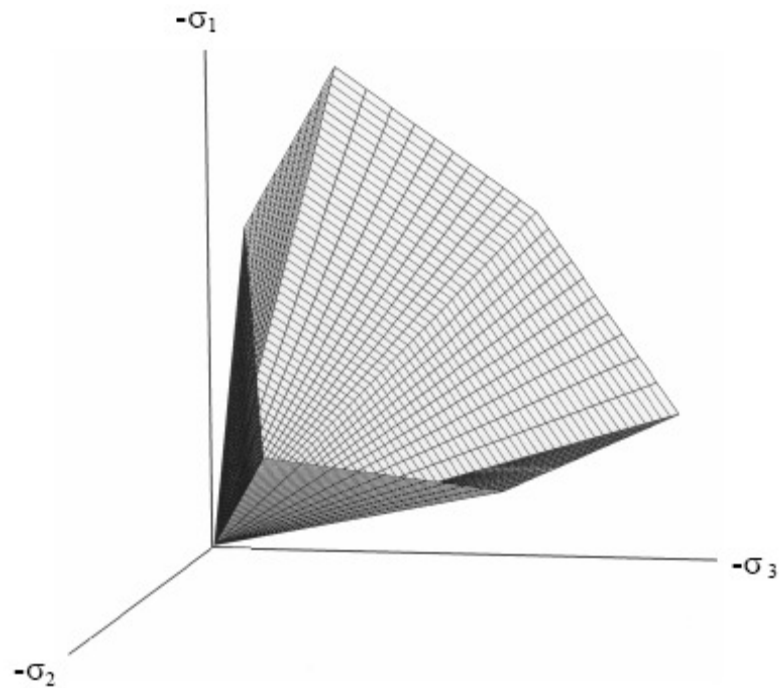
ϵ	kokonaismuodonmuutos
ϵ^e	elastinen muodonmuutos
ϵ^p	plastinen muodonmuutos

Elasto-plastisten muodonmuutosten kaava (14) sijoittamalla Hooken lain mukaiseen jännitysten ja muodonmuutosten väliseen kaavaan saadaan yhtälö (15) (Plaxis, 2005).

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{D}}^e \underline{\dot{\epsilon}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\dot{\epsilon}} - \underline{\dot{\epsilon}}^p) \quad (15)$$

$\underline{\underline{D}}^e$	elastinen materiaalmatriisi
-------------------------------	-----------------------------

Mohr-Coulombin myötöpinta sijoittuu kuvan 13 mukaisesti pääjännityskoordinaatistoon koheesion ollessa nolla.



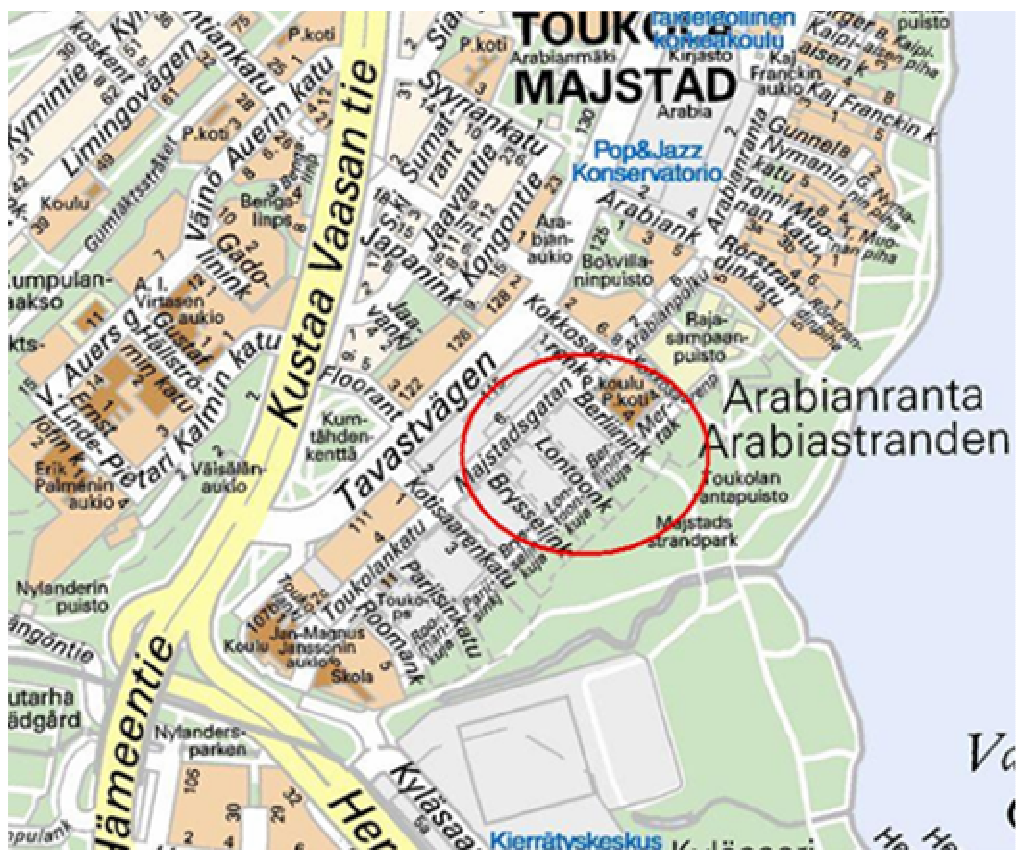
Kuva 13 Mohr-Coulombin myötöpinta pääjännityskoordinaatistossa ($c=0$) (Plaxis, 2005)

Aiemmissa luvuissa esitellyt laskentakaavat ovat käyttökelpoisia, jos maaperässä ei tapahdu suuria vaihteluita ja maakerrosrajat ovat melko säännöllisiä ja vaakasuuntaisia sekä kun halutaan nopeasti arvioida maaperässä esiintyviä voimia. Tässä diplomityössä käsiteltävän tehtävän maakerrosrajat kuitenkin vaihtelevat jyrkästi, kuten myös maalajien materiaaliparametrit. Tämän vuoksi esitellyt laskentakaavoja ei kyetty käyttämään saamaan aikaan halutunlaiset ja tarkat tulokset laskelmista. FEM-laskennassa voidaan ottaa huomioon hyvin erilaisia muuttujia ja materiaalien rajapinnat mallintuvat luotettavammin ja realistisemmin kuin pelkkiä yksikertaisia kaavoja käyttämällä.

6 Toukorannan suojaseinä

6.1 Kohde

Kohde sijaitsee Helsingissä Toukolan kaupunginosassa Toukorannan alueella. Koko rakennettava alue rajoittuu etelässä Brysselinkatuun, idässä paksuun louhetäyttöön, jota kutsutaan nimellä KTK-penger ja sitä vierustavaan Toukolan rantapuistoon sekä pohjoisessa Kokkosaarenpolkuun (kuva 14 ja liite 1). Pohjaantäyttö KTK-pengertä rakennettaessa ei täysin onnistunut, josta johtuen täytön ja kovan pohjan väliin on jäänyt löyhä savikerros. Paaluseinä kiinnittyy paalulaatan Toukolan rantapuiston puoleiseen reunaan KTK-penkereen viereen. Paalulaatalle rakennettiin Arabianrannan peruskoulun laajennusosa sekä liikenne- ja piha-alueita.



Kuva 14 Toukolan alue Helsingissä. Paalulaatan alue sijaitsee merkityssä kohdassa. (Helsingin karttapalvelu)

Alueella on ollut aiemmin myös mm. metalliromun varastointi- ja myyntitoimintaa, rengasliikkeitä, korjaamoja ja Helsingin KTK Oy:n huoltoasema (josta nimitys KTK-penger rannanpuoleiselle louhetäytölle) ja Helsingin rakennusviraston auto- ja konekeskus ja kunnossapito-osasto sekä tankkauspiste. (Uudenmaan ympäristökeskus, 2007)

Helsingissä rakennustilan puute on johtanut siihen, että merenpohjaa on (varsinkin 70-luvulla) alettu täyttää uuden rakennusalan aikaansaamiseksi. Täyttöjen laatua ei aikaisempina vuosikymmeninä ole valvottu kovinkaan tarkasti, joten niiden sisällöt vaihtelevat laidasta laitaan ja onkin vaikeaa monen vuosikymmenen jälkeen saada selville, mitä mereen on kaadettu. Osaksi täytöt ovat saastuneita ja huonolaatuisia, mistä aiheutuu ongelmia tulevalle rakentamiselle maan puhdistamiselle asetettujen säännösten myötä. Sekalainen täyttö aiheuttaa paljon haasteita geotekniselle suunnittelulle.

Toukorannan alueella on pilaantunutta maaperää kunnostettu vuonna 2002. Kunnostettava alue rajautui Arabianrannan koulun itä- ja eteläpuolelle ja lähes koko tässä diplomityössä käsitelty paalulaatta-alue oli kunnostuksen kohteena (kuva 14 ja liite 1). Maaperää puhdistettiin mm. öljy- ja bensiinihiilivedyistä. Koska alueella on koulu ja uusi koulun laajennusosan sijoittuminen suunniteltiin pilaantuneen maaperän kohdalle, kunnostuksessa tuli ottaa huomioon, että maaperään ei jäänyt pilaantuneita aineksia, jotka nieltynä aiheuttaisivat vaaraa. (Uudenmaan ympäristökeskus, 2007)

6.2 Maaperä

Ennen rakentamista luonnollinen maanpinta Toukorannan alueella kulki noin tasolla +2,0 ja luonnollinen rantaviiva vielä 40-luvulla noudatteli Toukolankatua (liite 1). Maaperässä paalulaatta-alueella kulkee kaksi louhepengertä, vakaampi läntinen Mertakadun pengertä ja epävakaampi, aikanaan sortunut, itäisempi KTK-pengertä (liite 1, 1. ja 2. louhepengertä). Mertakatu näkyy vielä kuvassa 14, mutta rakentamisen myötä sitä ei enää ole, kts. liite 1. Lännessä, jossa luonnollinen rantaviiva kulki, on vielä yksi pengertä, jota kutsutaan ratapenkereeksi. Tälle penkereelle oli aikoinaan tarkoitus rakentaa Helsinkiin Lahden suunnasta tuleva junarata.

KTK-penkereen sortuminen ei ole vielä täysin loppunut, vaan se leviää edelleenkin itä-länsisuunnassa. Juuri tämän penkereen epävakaasta tilanteesta on syntynyt suojaseinän tarve. KTK-pengertä sortui mereen vuonna 1963, jolloin merenranta oli lähempänä. Tämän jälkeen täyttöä on jatkettu ja rantaviiva kulkee kuvan 14 (kartta alueesta) mukaisesti. Louhepenkereiden täyttö on tehty mereen päätypenkereinä etelästä pohjoiseen.

Maaperä alueella on routivaa ja hyvin aggressiivista, johtuen osittain alueella aiemmin tapahtuneesta toiminnasta (kohta 6.1). Maaperän kunnosta johtuen teräs-paalurakenteet mitoitettiin 4,0 mm korroosiovaralla.

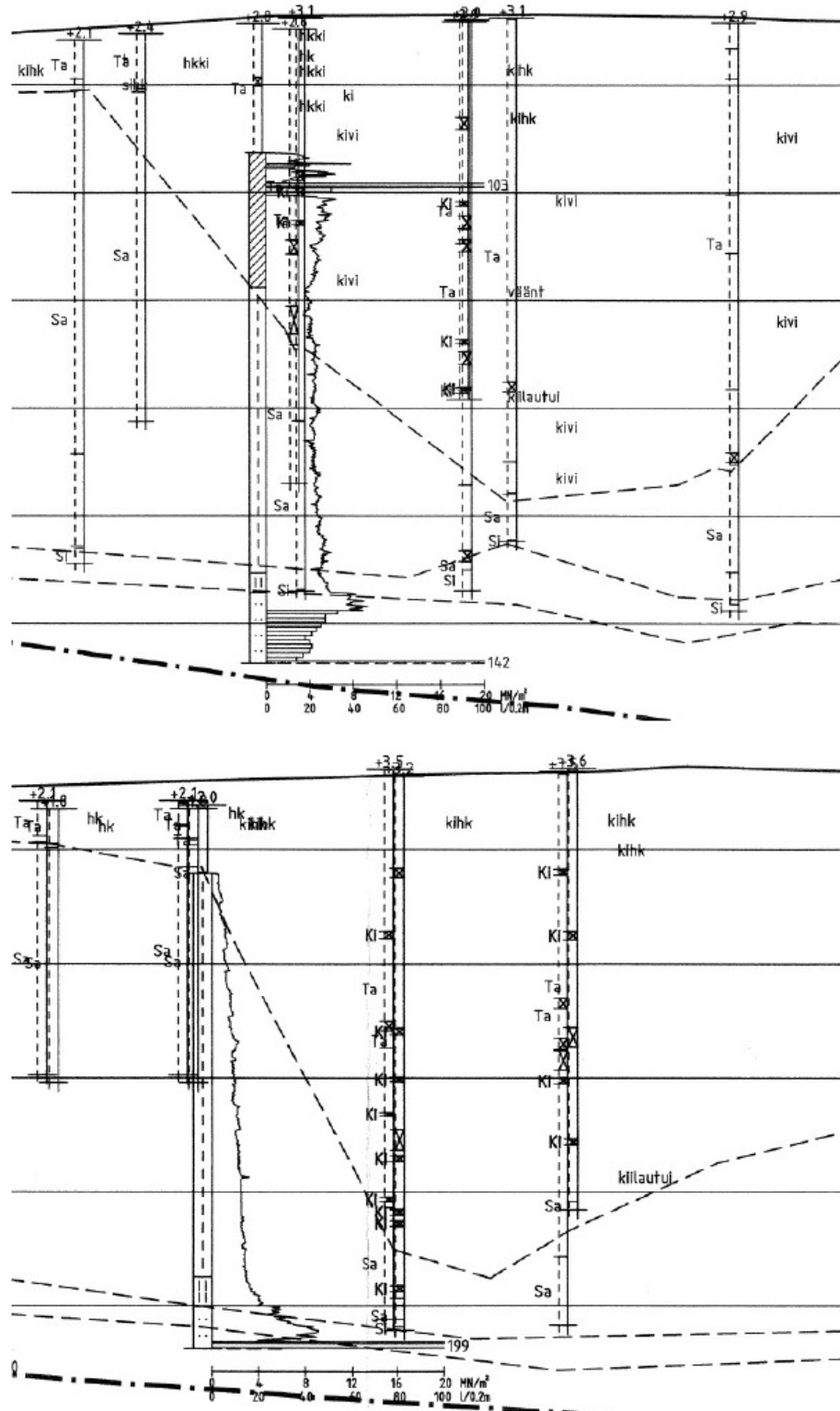
Pohjavesi seuraa meren läheisyyden vuoksi merenpinnan vaihteluita. Vaihteluraja on noin -0,5...+1,4. Aluetta ei ole luokiteltu varsinaiseksi pohjavesialueeksi, vaan varsinainen pohjavesi kulkee savikerroksen alapuolisessa hikkakerroksessa noin 5...25 metrin syvyydessä. (Uudenmaan ympäristökeskus, 2007)

Alueen keskellä kulkevaa louhepengertä kutsutaan Mertakadun penkereeksi. Mertakadun pengertä on kevennetty sementtistabiloidulla savella tasolle -5,0 asti. Penkereen alueella käytettiin paalulaatan alla teräsputkipaaluja, teräsbetonipaalut eivät pystyneet läpäisemään louhetäyttöä ehjinä. Alueen toinen louhepengertä,

KTK-penger, sijaitsee paalulaatan itäreunan ja Toukolan rantapuiston välissä. KTK-penger ”kelluu” savikerroksen varassa ja siihen on sekoittuneena paikoin savea ja muita hienorakeisia aineksia sekä purku- ja rakennusjätettä. KTK-penkereen paksuus vaihtelee noin 5 metristä 20 metriin. Alueella on muina täytömaterialleina käytetty mm. hiekkaa, soraa, kiviä, louhetta, rakennusjätettä, tiiltä jne. Pengertä on kevennetty tasolle -3,0 stabiloidulla turpeella. Kevennys ei ole tarpeeksi kantavaa raskaalle kalustolle. Kuvassa 15 on kairaustuloksia KTK-louhepenkereen kohdalta.

Penkereiden välisellä alueella savikerroksen paksuus on noin 20 metriä. Savikerros on yläosastaan liejuista (ljSa) muutaman metrin matkalta, jonka jälkeen alkaa tiiviimpi savi (Sa). Saven konsolidaatio on kesken ja sen oletetaan tiivistyvän ja painuvan paalulaatan alla hyvän aikaa.

KTK-penkereen alla savi- ja liejukerroksen yläpinta kulkee louhetäytön alapinnalla ja rajoittuu alhaalta moreenikerrokseen. Koko paalulaatan alueella paalujen tunkeutumisvyvyys vaihtelee tasovälillä -11,5...28,0 (pisimmät paalut KTK-penkereen vieressä, lyhyimmät paalulaatan toisessa päässä koulurakennuksen vieressä). Tunkeutumisvyvydessä sijaitsee joko kallion pinta tai tiivis moreenimaakerros. Tarkat näytetutkimukset maaperästä on tehty vain saven osalta (liite 2 sekä kuva 21). Tarkat maaperätiedot ja maakerrosten sijoittuminen on esitelty luvussa 6.4.2 Laskennan lähtötiedot.



Kuva 15 Kairauksia KTK-penkereen kohdalla (Helsingin kaupunki, 2006). KTK-penkereen muoto erottuu molemmissa kairausleikkauksissa selvänä U-muotona saven keskellä.

6.3 Tukirakenne

6.3.1 Paalulaatta

Paalulaatta (kuva 16), jonka paalutusten suojaksi suojaseinä suunniteltiin, sijaitsee kuvan 12 ja liitteen 1 osoittamalla paikalla. Laattatyypinä on sienilaatta, jonka keskimääräinen neliöpaino on $7,0 \text{ kN/m}^2$. Pohjarakenteiden suunniteltu käyttöikä on 200 vuotta.



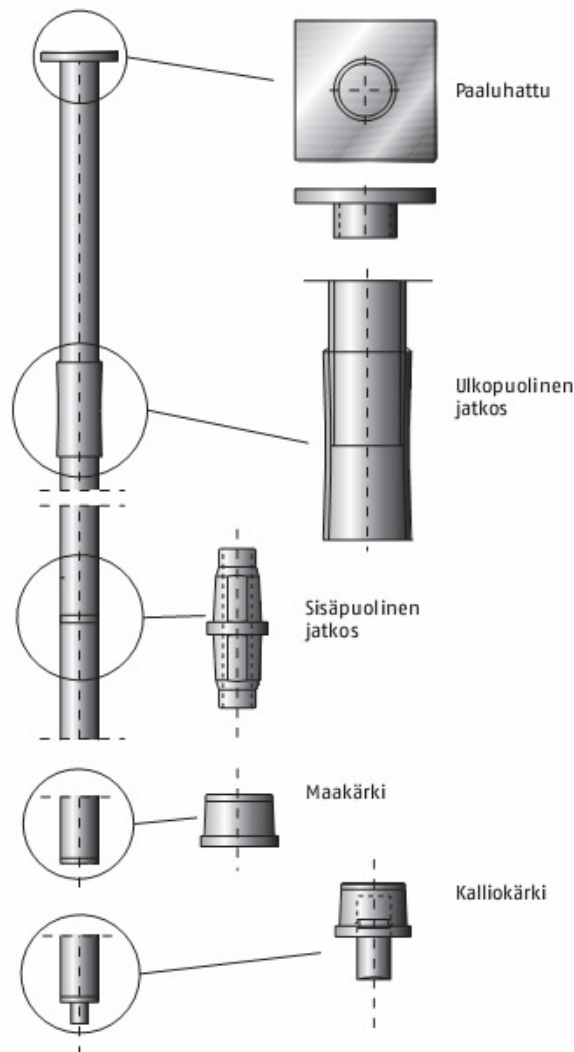
Kuva 16 Paalulaatan raudoitusta ja valmista laattaa. Paalut tihennetyn raudoituksen alla.

Liitteessä 1 on merkitty paalulaatan alue sekä siihen liittyvien paalurakenteiden ja suojaseinän sijainti. Suojaseinän muodostavat RR711-paalut sijaitsevat paalulaatan reunalla ja paalulaatan RR220-paalut paksun louhetäytön kohdalla, muulla paalulaatan alueella on käytössä 300x300 – teräsbetonipaaluja. Paalulaatan päälle

tulevassa täyttökerroksessa kulkevat alueelle sijoitettavat kunnallistekniset rakenteet.

6.3.2 Paalutukset

Paalulaatan alueella käytetään sekä teräsputki- että teräsbetonipaaluja. Paalujen sijoitus riippuu louhetäytteen paksuudesta. Teräsputkipaalut ovat tyypiltään RR 220 mm / 12,5 mm (kuva 17) ja teräsbetonipaalut 300 x 300 mm². Teräsputkipaaluihin on asetettu 4 kappaletta Ø32 mm teräsiä savikerroksen pituudelta ja paalut on betonoitu. Paalujen jatkaminen tapahtui sisäpuolisilla jatkoksilla.



Kuva 17 RR-paalujen rakenne (Ruukki, 2005)

Teräsputkipaalujen kantavuudeksi on laskettu 1100 kN nurjahduksen varalta savi-kerroksen paksuuden vuoksi. Teräsbetonipaalut on mitoitettu Lyöntipaalutusohjeen LPO-05 luokan IB perusteella, josta saadaan niiden geotekniseksi kantavuudeksi 810 kN.

Paalulaatan reunaan KTK-penkereen suuntaisesti suojaseinäksi tulivat teräspaalut RR 711 mm / 14,2 mm kolmen metrin välein liitteen 1 osoittamalle alueelle. Paalut liitetään paalulaattaan kuvan 20 mukaisesti nivelellisesti. Suojaseinän länsipuolelta alkavat varsinaiset paalulaatan paalut ja itäpuolella on paalulaattaan kuuluva siirtymälaatta. Etäisyys suojaseinän paaluista seuraavaan paalulaatan paaluriiviin on 2,4...3,2 metriä riippuen siitä, mikä kuormitusalue on kyseessä. Suojaseinän paalujen yläpää on yleisesti tasossa +0,0 ja alapää 21...28 metrin syvyydellä. Kuvassa 18 RR711-paaluja sekä niiden paaluttamista. Paalujen kärkeen asennettiin kalliokärki. Paalut betonoitiin, mutta niihin ei asetettu teräsvahvistuksia, kuten RR220-teräspaaluihin.



Kuva 18 RR711-paaluja Toukorannan työmaalla

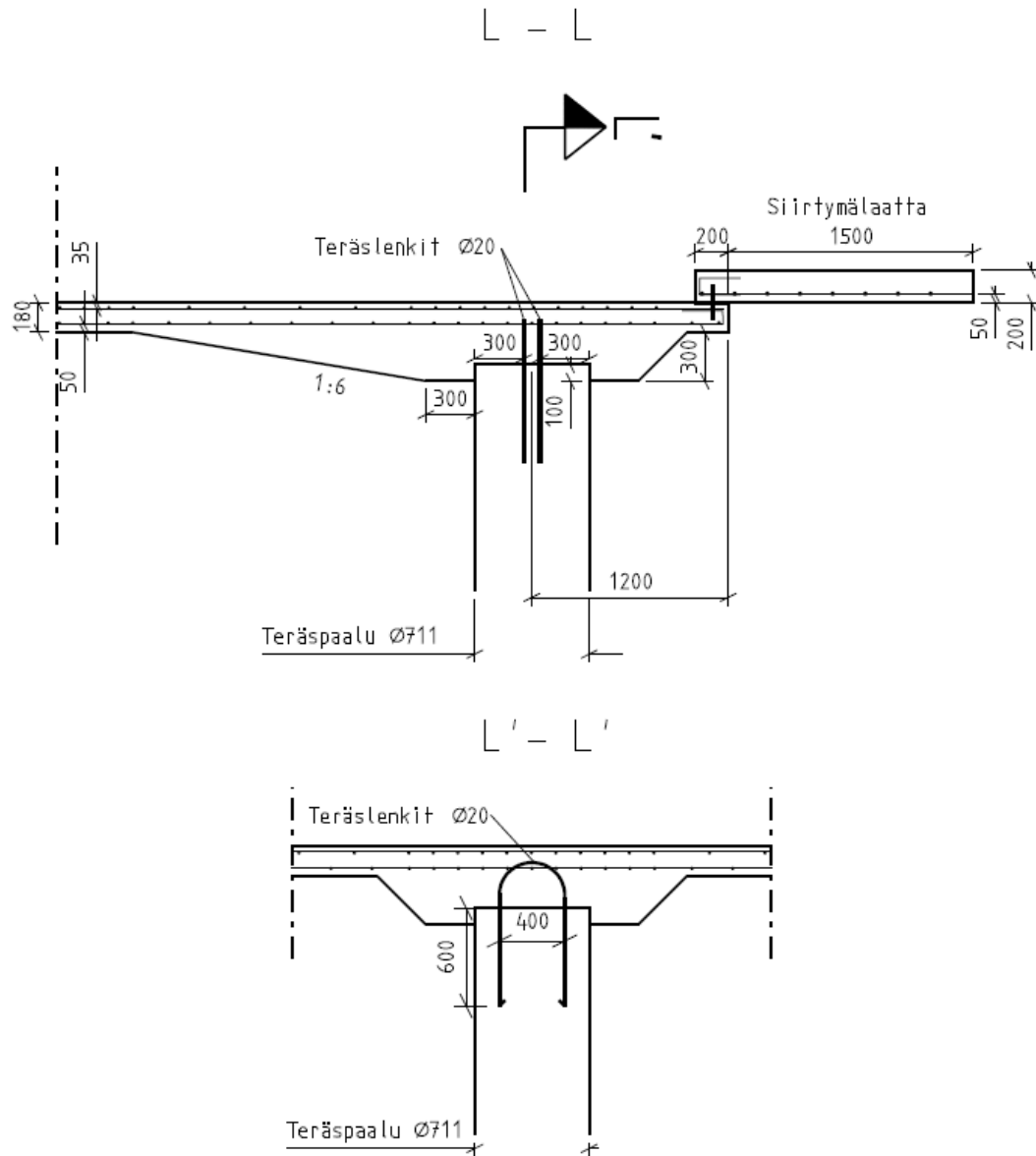
Kuvassa 19 näkyy valmista suojaseinää ja laattaa suojaseinän päällä sekä paalujen kiinnittämiseen laattaan tarkoitettuja teräslenkkejä. Kuten kuvasta 19 näkyy, KTK-penkereen läheisyydessä paalutettaessa ensimmäiseksi tehtiin suojaseinän paalutukset ja tämän jälkeen paalutettiin alueet suojaseinään asti. Tällä vältettiin paalulaatan paaluja häiritsemästä KTK-penkerettä.



Kuva 19 Suojaseinä jatkuu, etualalla olevassa RR711-paalussa kuvan 20 mukaiset teräslenkit.

Paalurivejä laatussa on RR711-paalurivistön pohjoispuolella noin 25 kappaletta (vaihtelee paalutyypistä ja -välistä riippuen). Kuvassa 20 on rakennepiirustus suojaseinän paalujen liittämisestä paalulaattaan sekä saman alueen raudoitus.

Kahdella suojaseinän RR711-paalulla tehtiin staattiset koekuormitukset. Esirakentamisvaiheissa 1 ja 2 kahdelle paalulle tehtiin O-cell – kuormituskokeet. Maaperän ja rakenteiden liikkeitä seurataan inklinometrien avulla.



Kuva 20 RR711-paalun liittäminen paalulaattaan. Leikkaus L-L paalulaatan reunasta suojaseinän ja KTK-penkereen suuntaisesti ja leikkaus L'-L' laatan reunaa ja suojaseinää kohtisuoraan (liite 1). Paalu on liitetty laattaan nivelellisesti, jotta paalun taipumisesta ei aiheudu laatan rikkoutumista.

6.4 Laskelmat

6.4.1 Laskennan lähtöoletukset

KTK-penkereen massan painuessa Toukorannan savimaahan aiheutuu maaperään ja pohjarakenteisiin ylimääräisiä voimia sekä siirtymiä. Louhepenkereen vaikutusta pyrittiin esirakentamalla vähentämään siten, että sen aiheuttamat liikkeet maaperässä paalurakenteita kohti loppuvat. Penkereen liikkeet paalulaattaan päin aiheuttavat paaluihin vaakavoimia ja taivutusmomenttia. RR711-paalut ottavat nämä voimat vastaan ja estävät niiden muodostumista paalulaatan paaluihin. Aikaa myöten RR711-paalut taipuvat penkereen massan vaikutuksesta ja aiheuttavat kuormitusta myös itse paalulaattaan. Tämän vuoksi osa laatan paaluista on tehty vinopaaluina kallistuksella 20:1.

Laskennassa on määritetty KTK-penkereen aiheuttamien voimien suuruus ja paalun kapasiteettiin niitä vastaan sekä paaluihin väistämättä aiheutuvat vaakakuormat ja myöhempi taipuminen. Maamassan aiheuttamat voimat on laskettu Plaxis-laskentaohjelmalla, jolla mallinnettiin maaperän toimintaa suojaseinän kanssa.

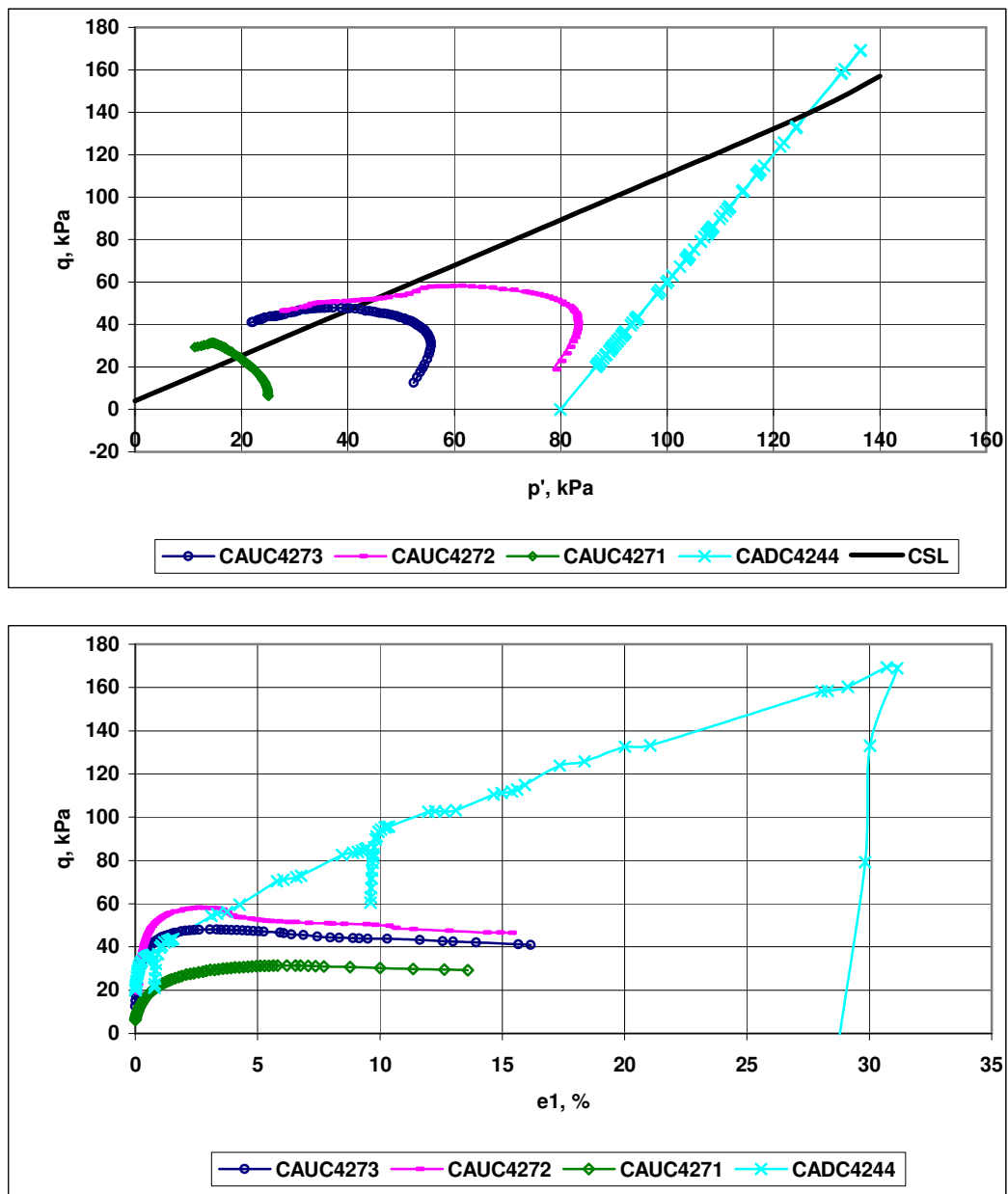
Pohjaveden pintaa ei rakennettaessa alennettu vaan se on samalla tasolla merenpinnan kanssa. Esitietojen (Toukorannan esirakennussuunnitelma, Helsingin kaupunki) perusteella louhe sisältää tosin huomattavat vesivarastot. Merenpinnan vaihteluiden takia pohjavedenpinta voi vaihdella paljonkin (esim. tulvien aikaan pinta voi nousta puolikin metriä). Laskelmissa pohjavedenpinnan oletettiin olevan tasolla +0,0.

Lähtöoletuksena käytettiin myös sitä, että paalut eivät liiku paikaltaan vaan ottavat vastaan louhepenkereen liikkeet muodonmuutoksin ja siirtäen vaakakuormituksesta osan paalulaattaan. Louhepengertä estetään näin valumasta paalulaatan alle savikerrokseen ja aiheuttamasta paalulaatan paaluille sivukuormitusta ja taipumia.

6.4.2 Laskennan lähtötiedot

Laskelmia varten tarvittavat parametrit ovat näytetutkimuksilla määritettyjä vain saven (Sa) ja liejuisen saven (ljSa) osalta. Savikerroksesta tehtyjen ödometriko-keiden tuloksia on esillä liitteessä 2 ja kolmiakselikokeen puolestaan kuvassa 21. Muiden maakerrosten lähtöparametrit ovat keskimääräisistä maalajin arvoista määriteltäviä sekä samalta alueelta tehdystä diplomityöstä (Hassan, 2006).

KTK-penkereen louhetäyttö on hyvin sekalaatuista ja sisältää osaksi myös savea ja muita hienorakeisia aineksia. Suurin osa alueella tehdyistä kairauksista on painokairauksia (kuva 15, kairauksia KTK-penkereen kohdalla), siipikairauksilla puolestaan on selvitetty leikkauslujuutta (kuva 22). Siipikairaustulosten kuvassa 22 perusteella saviaines on hyvin pehmeää ja sen leikkauslujuus vaihtelee välillä 6...17 kPa. Savikerros jakautuu liejuiseen saveen (ljSa) ja saveen (Sa). Ödometriko-keiden (liite 2) perusteella liejuisen saven vesipitoisuus vaihtelee välillä 100...131 % (keskimäärin 112 %) ja saven välillä 66...114 % (keskimäärin 89 %).



Kuva 21 Saven kolmiakselikokeiden tuloksia, jännityspolut sekä q, ε_1 -kuvaaja (TKK, Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio, 2004)

Taulukossa 1 on esitelty maaperässä olevien maakerrosten parametrit, joita käytettiin laskennoissa. Nämä maakerrokset ovat: 1 täyterkerros, 2 stabiloitu turvekerros, 3 KTK-penkereen louhetäyttö, 4 liejuinen savikerros (pehmeämpi kuin itse savikerros), 5 savikerros ja 6 siltti-, hiekka- ja moreenikerros (kts. maakerrosten sijoittuminen kuvista 23 ja 25). Laskelmissa käytettiin kuvien 23 ja 25 mukaisia las-

kentamalleja, joihin on merkitty taulukon 1 maakerroksen vastaavalla numerolla. Laskentamallit ovat paalulaatan reunalla louhepenkereen paksuimmalla kohdalla sekä hieman ohuemmalla louhepenkereen osuudella. Kuvissa 24 ja 26 on laskentamallien elementtiverkot Plaxis-ohjelmassa. Laskentamallien leveys on noin 40 metriä ja syvyys 29 metriä.

Taulukko 1 Laskennassa käytetyt parametrit

	1	2	3	4	5	6
Maalaji	Tä	Stab. Tv	Lo-täyttö	ljSa	Sa	Mr
γ (kN/m ³)	21,0	12,0	24,0	13,2	15,6	22,0
γ' (kN/m ³)	20,0	2,0	21,0	3,2	14,0	18,0
c' (kN/m ³)	10,0	2,0	1,0	3,2	5,6	1,0
ϕ' (°)	25,0	20,0	40,0	27,7	27,7	38,0
ψ (°)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
E (MN/m ²)	40,0	5,0	45,0	7,6	4,8	81,0
k (m/päivä)	1,000	3,000E-05	1,000	3,456E-05	5,184E-06	5,000
ν	0,350	0,100	0,350	0,100	0,130	0,350
Kerroksen paksuuden vaihteluväli (m)	0...3	0...3	0...20	0...5	2...13	5...7

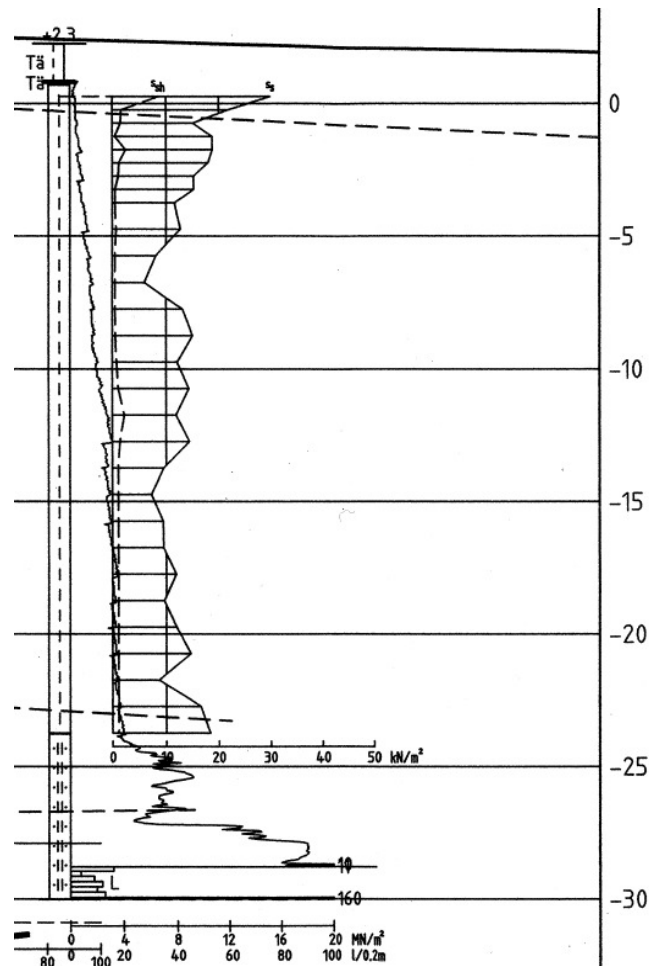
Taulukossa 1 käytetyt parametrit ovat:

γ	tilavuuspaino (kN/m ³)
γ'	tehokas tilavuuspaino (kN/m ³)
c'	tehokas koheesio (kN/m ³)
ϕ'	tehokas kitkakulma (°)
ψ	dilataatiokulma (°)
E	kimmomoduuli (MN/m ²)
k	vedenläpäisevyys (m/päivä) (sekä x- että y-suuntiin)
ν	Poissonin luku.

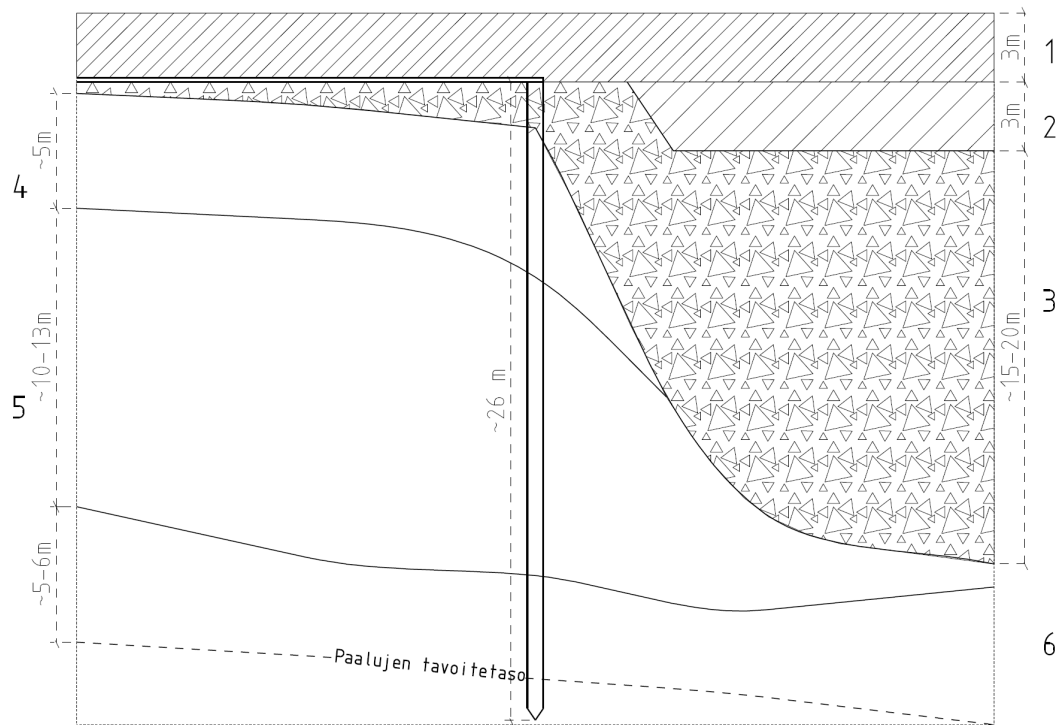
FEM-menetelmällä määritettiin taulukon 1 arvoja käyttäen Plaxis-ohjelman avulla tasomuodonmuutostilassa suojaseinänä toimivien paalujen siirtymät ja syntyvien voimien suuruudet sekä maakerrosten tarkempi käyttäytyminen. Maaperätietojen lisäksi laskelmissa tarvittiin tiedot paalulle sen mallintamista varten. Nämä materiaalitiedot ovat taulukossa 2. Laskennassa paalun pituutena käytettiin 26 metriä.

Taulukko 2 RR711-paalun materiaalitietoja (Ruukki, 2005; Ruukki, 2007)

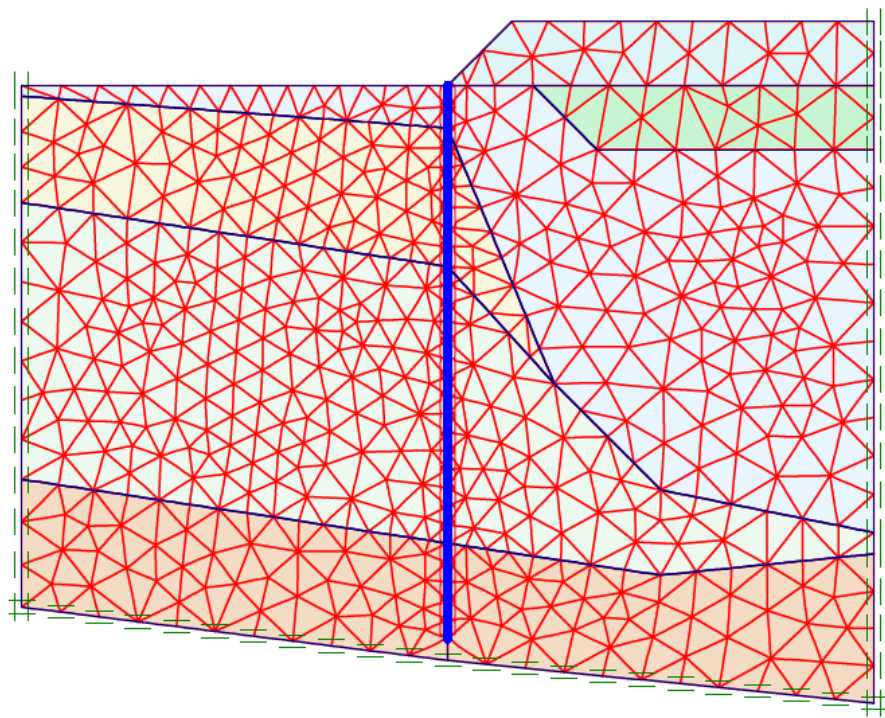
	d (mm)	Taivutusjäykkyys EI (kNm ²)	Jäykkyys EA (kN)	Paino w (kN/m/m)	Poissonin luku v
RR711/14,2	711,0	3,96E+05	6,53E+06	24,4	0,0



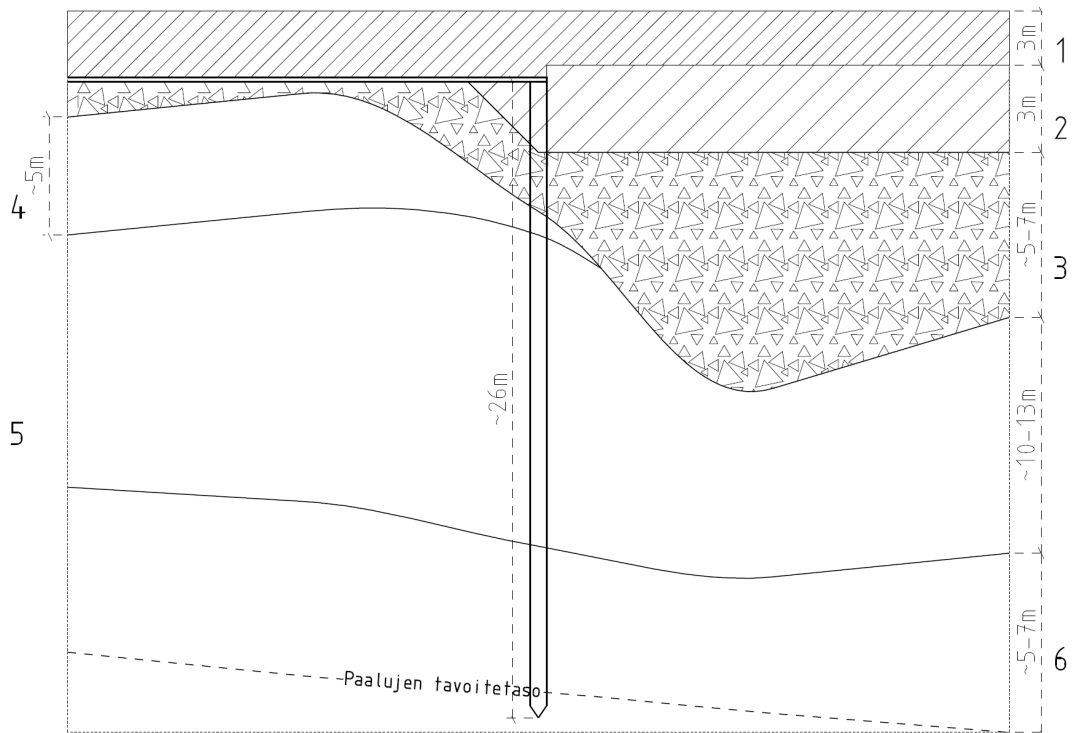
Kuva 22 Saven leikkauslujuus siipikairaustuloksista, lujuus vaihtelee välillä 6...17 kPa (Helsingin kaupunki, 2006)



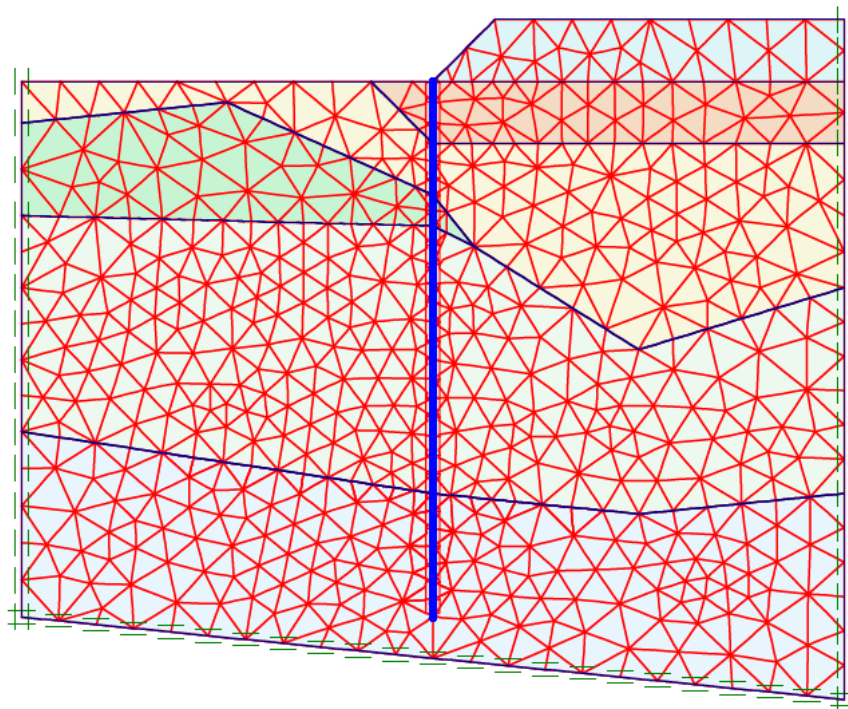
Kuva 23 Laskentamalli 1. Louhepengerrakkeiden paksuimmillaan (noin 15–20 metriä). Maakerrosten tiedot ovat taulukossa 1. Mallin sijainti liitteessä 1.



Kuva 24 Plaxisin elementtiverkko laskentamallista 1



Kuva 25 Laskentamalli 2. Ohuempi (noin 5-7 metrinen) louhepenger kuin laskentamallissa 1. Maakerrosten tiedot ovat taulukossa 1. Mallin sijainti liitteessä 1.



Kuva 26 Plaxisen elementtiverkko laskentamallista 2

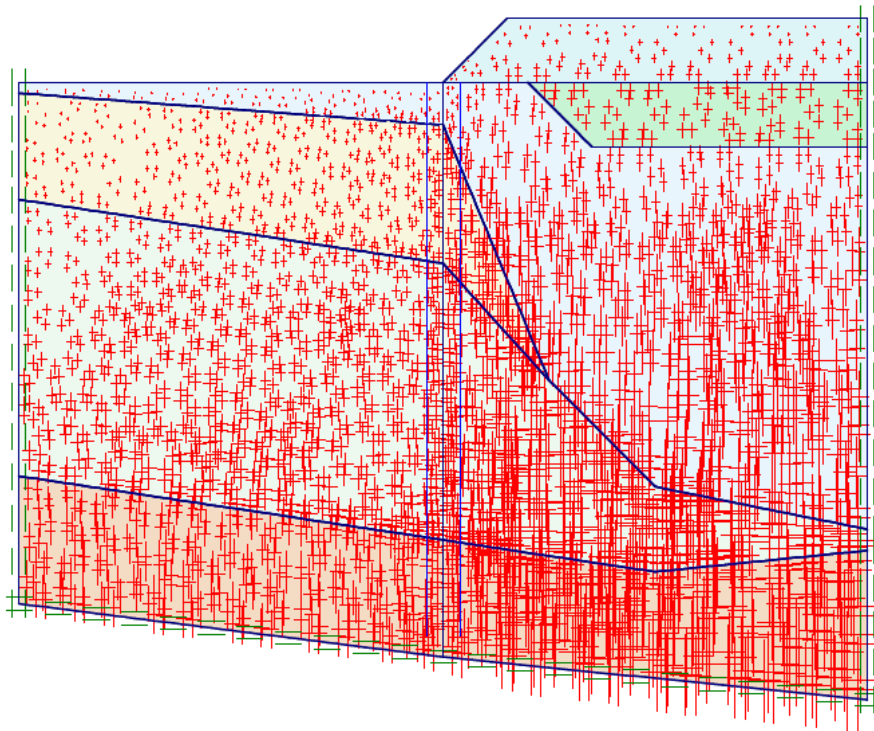
6.4.3 Plaxis V8.6-laskelmien tulokset

FEM-laskennassa käytettiin Plaxis-ohjelman versiota 8.6. Maaperän liikkeistä ja suojaseinän mitoittamisesta haluttiin tarkka kuvaus, johon FEM-menetelmällä saadaan melko tarkka vastaus. Plaxiksella saatiin tarkka kuvaus maanliikkeistä ja maaperässä olevista jännityksistä sekä paaluun kohdistuvista voimista. Kuvissa 23 ja 25 esitettyjen laskentamallien mukaiset tilanteet mallinnettiin Mohr-Coulombin materiaalmallien avulla. Maaperä on varsin sekalaatuista, joten tarkemmista malleista ei välttämättä olisi saatu tarkempaa tai realistisempaa kuvausta maan liikkeistä ja paaluun kohdistuvista voimista.

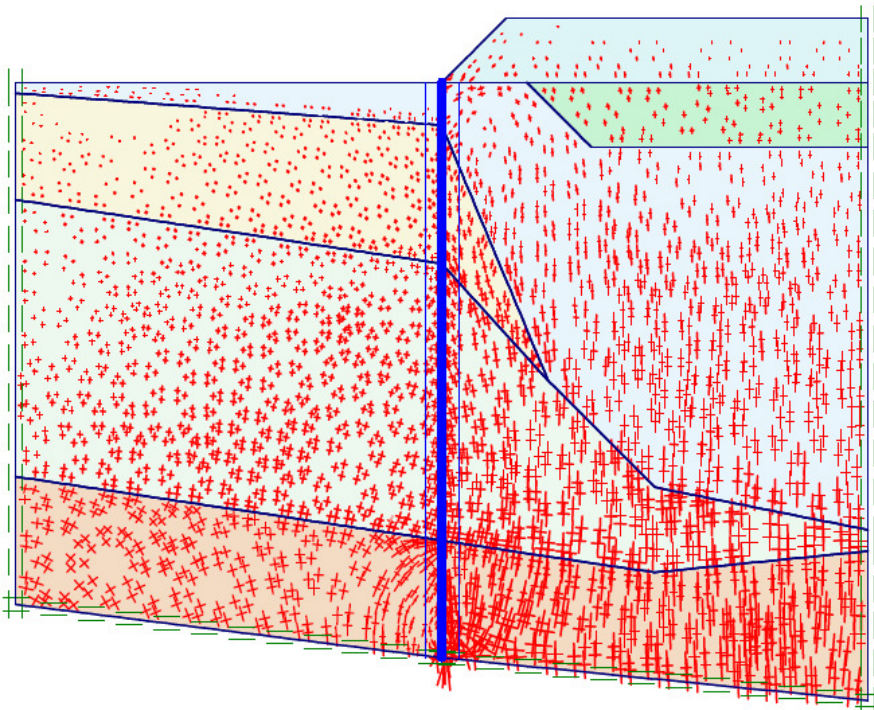
Laskennassa ei mallinnettu itse paalulaattaa. RR711-paalun taipuma ja liikkeet tapahtuvat pitkällä aikavälillä, tällöin maa paalulaatan alapuolella on painunut jonkin verran eikä maamassan paino laatan päällä vaikuta kuin paalulaatan muiden paalujen kantokykyyn. Plaxiksella näin ollen laskettaessa täyttömaa (kerroksen paksuus 3,0 metriä) vaikuttaa vain laatta-alueen ulkopuoliseen maamassaan eli KTK-penkereeseen.

Plaxisen laskentatulosten perusteella KTK-penkereestä aiheutuu RR711-paaluihin muodonmuutoksia sekä vaakakuormitusta. Vaakakuormitusta johdetaan paalulaattaan ja siihen sijoitettuihin 20:1-vinopaaluihin. Paalun taipuma tapahtuu sitä mukaan, kun KTK-penger painuu savimaahan.

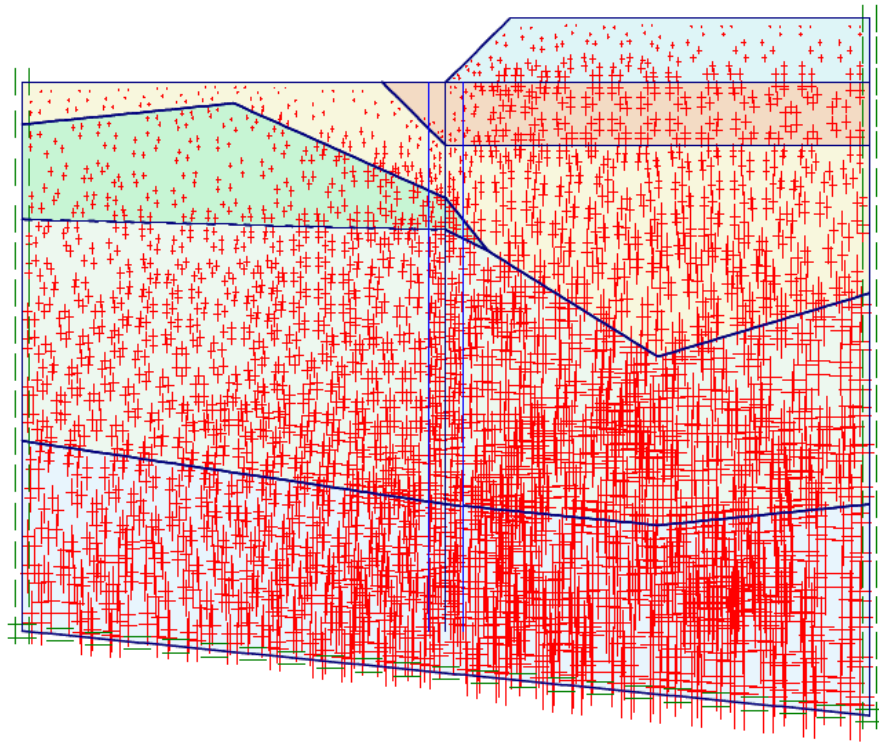
Plaxis-laskennat tehtiin molemmilla laskentamalleilla 1 ja 2 (kuvat 23 ja 25). Laskelmien tulokset ovat nähtävillä liitteissä 3 (laskentamalli 1, paksu louhetäyttö) ja 4 (laskentamalli 2, ohut louhetäyttö). Kuvissa 27 ja 28 on tehokkaiden pääjännitysten jakautuminen ja niiden suunnat laskentamallin 1 tilanteessa ilman RR711-paaluja ja paalutusten kanssa ja kuvissa 29 ja 30 samat tapaukset laskentamallin 2 tilanteessa.



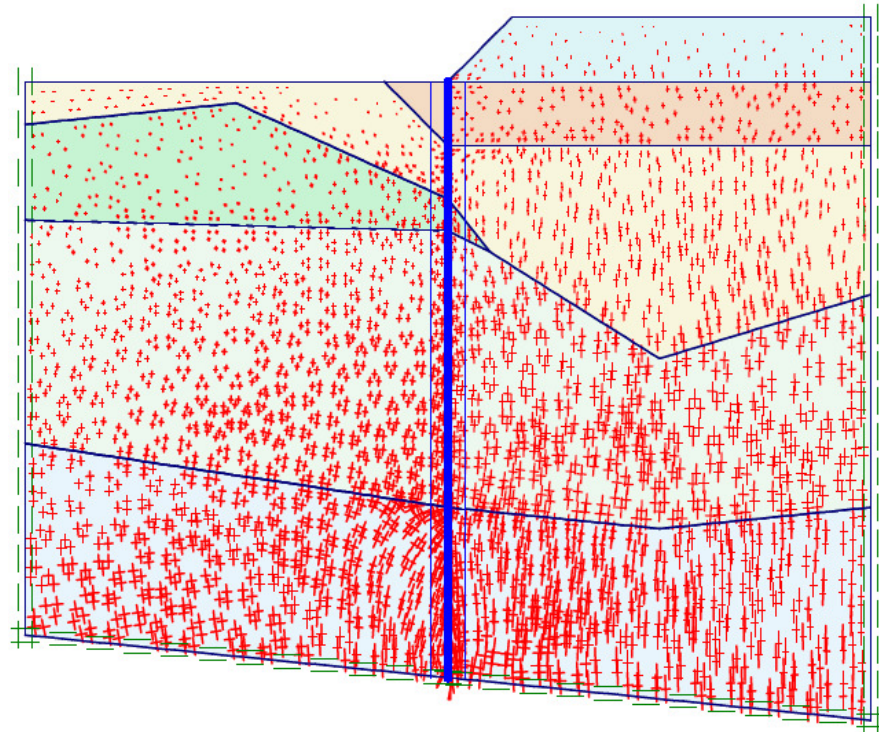
Kuva 27 Tehokkaat pääjännitykset suuntineen ilman suojaseinää (laskentamalli 1).



Kuva 28 Tehokkaat pääjännitykset suojaseinän kanssa (laskentamalli 1).



Kuva 29 Tehokkaat pääjännitykset ilman suojaseinää (laskentamalli 2).



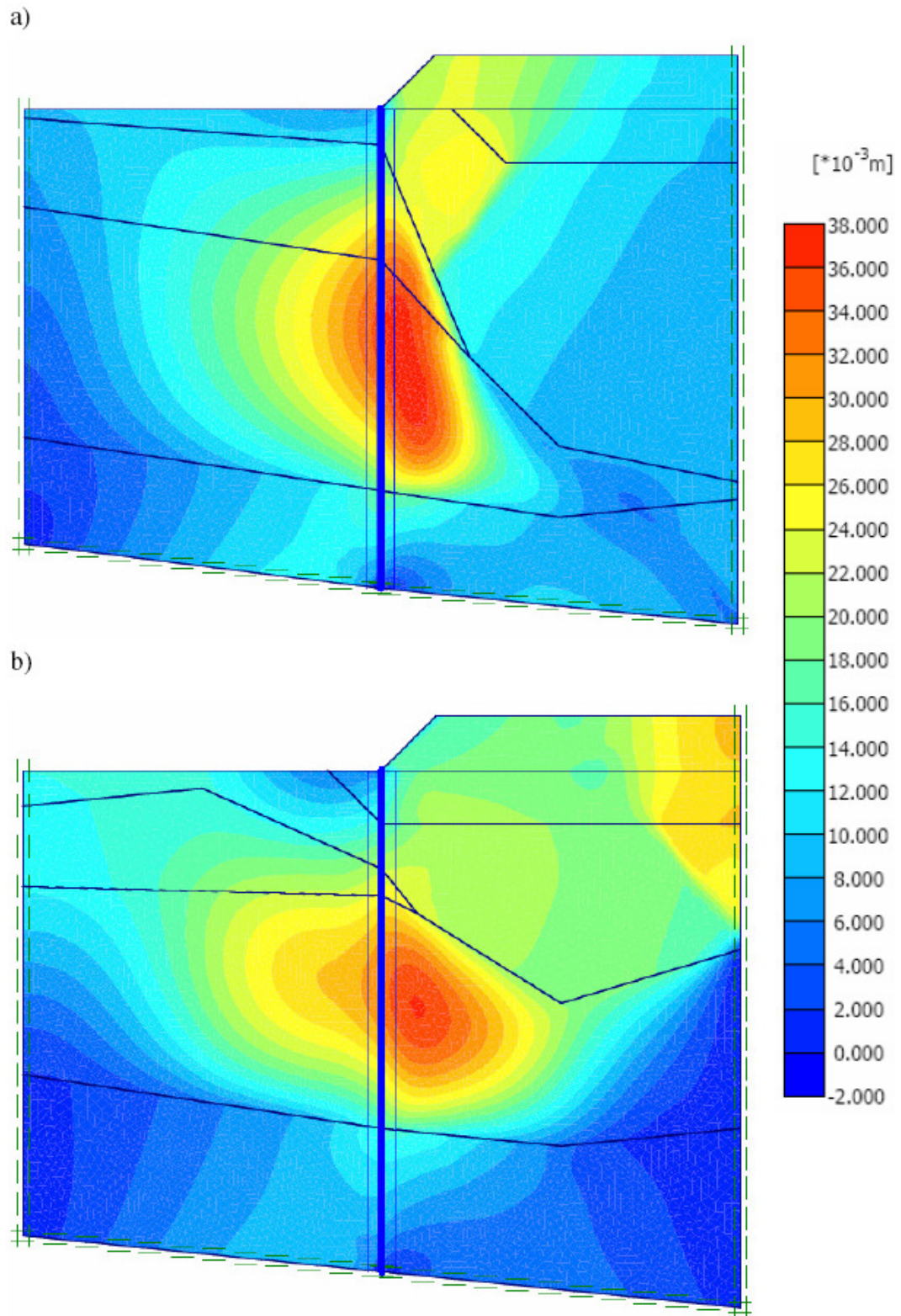
Kuva 30 Tehokkaat pääjännitykset suojaseinän kanssa (laskentamalli 2).

Tehokkaat pääjännitykset jakautuvat maaperässä selvästi eri tavalla ilman paalutuksia ja paalutusten kanssa. RR711-paalujen käyttäminen on kuvien 27 ja 28 perusteella vähentänyt jännityksiä paalulaatan alapuolisissa savikerroksissa, samoin jännitykset KTK-penkereen ja savikerroksen rajalla ovat pienentyneet. Suurimmat jännitykset kuvissa 28 ja 30 sijoittuvat RR711-paalun alapäähän. Laskentamallin 1 tilanteessa ilman suojaseinää tehokkaat pääjännitykset ovat suurimmillaan maaperässä 406 kN/m^2 (kuva 27). RR711-paalujen kanssa maksimiarvo on 1700 kN/m^2 (kuva 28). Laskentamallin 2 tilanteessa puolestaan pääjännitykset ovat suurimmillaan ilman suojaseinää 346 kN/m^2 (kuva 29) ja RR711-paalujen kanssa 811 kN/m^2 (kuva 30).

Maanpaineen jakautuminen suojaseinää vasten sekä laskentamallin 1 että laskentamallin 2 tapauksissa on esitetty liitteissä 3E ja 4E.. Maanpaineen jakautumisessa voidaan nähdä KTK-penkereen vaihtuminen savikerrokseksi ja sen jälkeen moreenikerrokseen. Maanpaine esiintyy paalua vasten passiivipaineena. Tämä johtuu KTK-penkereen liikkeistä paalua kohden ja alas savikerrokseen, tällöin paalun paalulaatan puoleisessa maaperässä ei tapahdu paaluun kohden liikkeitä.

Laskentamallin 1 tapauksessa maanpaine on suurimmillaan $393,07 \text{ kN/m}^2$ ja sen resultantti on 1980 kN/m noin 18 metriä paalun yläpäästä (liite 3E). Laskentamallin 2 tapauksessa puolestaan maanpaine on suurimmillaan $191,82 \text{ kN/m}^2$ ja sen resultantin suuruus on tällöin 1880 kN/m 17 metrin etäisyydellä paalun yläpäästä (liite 4E). (Huom. maanpaineen jakautumat eri mittakaavoissa laskentamallien 1 ja 2 tapauksissa, mittakaavat kuvien oikealla puolella.)

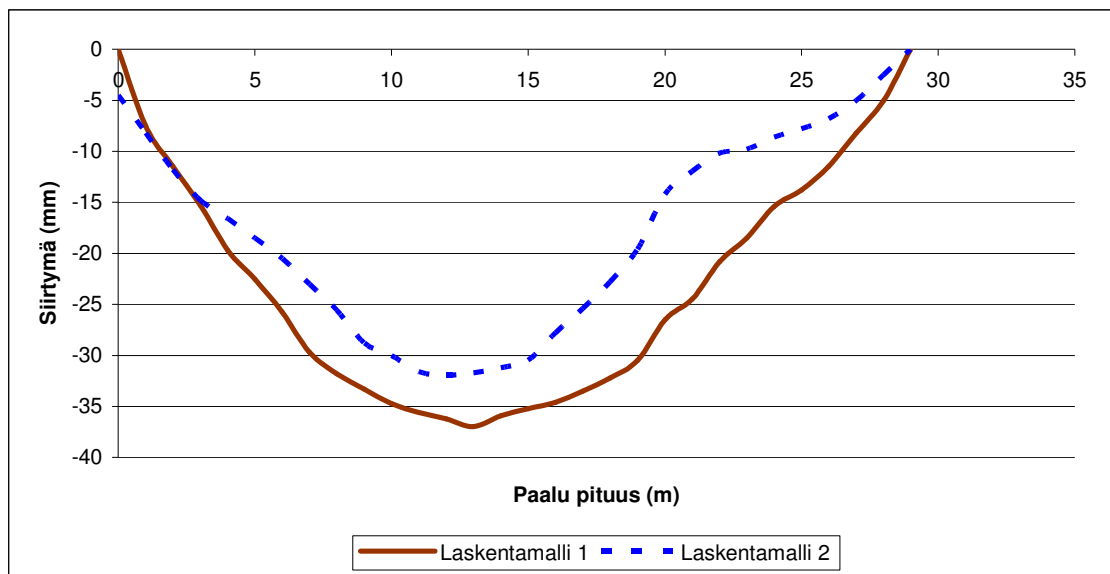
Laskennan perusteella suurimmat maaperän liikkeet muodostuvat louhepenkereen itäpuolelle kohtaan, jossa louhepengeri loppuu ja paksu savikerros alkaa (kuva 32, siirtymät nuolikuvioiden esittämänä liitteissä 3A ja 4A), eli noin 10–20 metriä maanpinnan alapuolelle. Samoin suurimmat leikkausjännitykset maaperässä muodostuvat louhepenkereen ja savikerroksen rajapinnalle, jossa maalaji vaihtuu (liitteet 3F ja 4F). Maaperässä tapahtuva plastisoituminen sijoittuu suurimmalta osin myöskin juuri louhepenkereen ja savikerrosten rajapinnalle (liite 3G ja 4G).



Kuva 31 Maaperän siirtymät: a) laskentamallin 1 ($U_{tot} = 39,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) ja b) laskentamallin 2 tilanteessa ($U_{tot} = 36,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$).

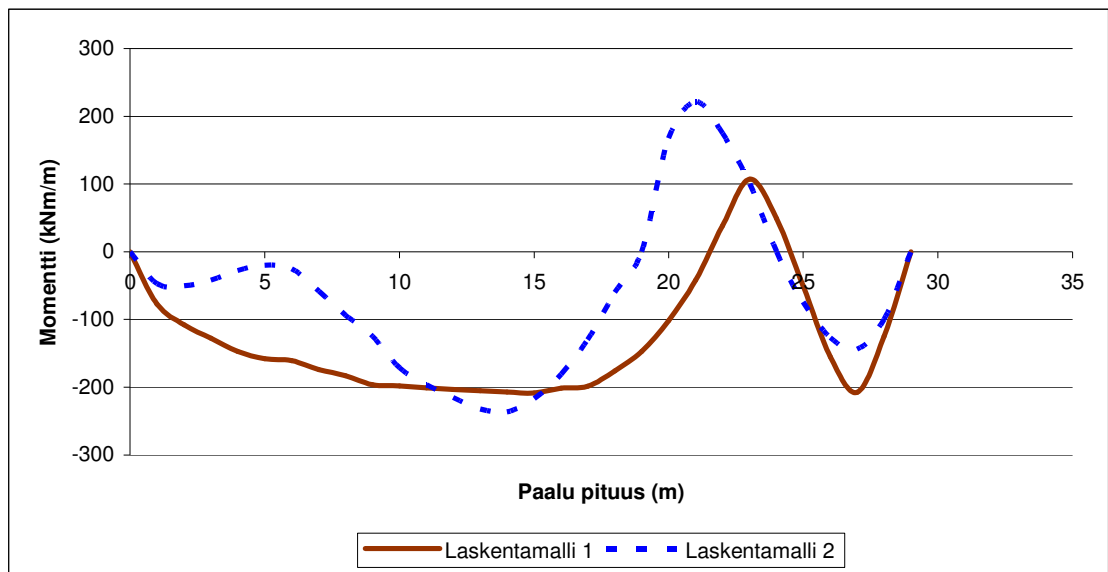
Suojaseinän siirtymä ja suojaseinään kohdistuva leikkausjännitys, momentti ja maanpaineen jakautuma on esitetty Plaxis-tulostuksissa liitteissä 3B-E paksun louhetäytön (laskentamalli 1) tapauksessa sekä liitteissä 4B-E ohuen louhetäytön (laskentamalli 2) tapauksessa. Paaluun kohdistuvat voimat (momentti, leikkausjännitys ja maanpaine) sekä siirtymä on myös koottu kuviin 32–34, joissa miinusmerkkisyys kuvaa siirtymän tai voiman suuntaa paalulaattaa kohden ja plusmerkkisyys paalulaatasta poispäin. Suojaseinän paalujen välinen etäisyys on 3,0 metriä.

KTK-penkereen vaikutuksesta paaluun aiheutuu muodonmuutoksia. Suurimmillaan paalun siirtymä on louhepenkereen paksuimmilla kohdilla (laskentamalli 1), jossa siirtymän suuruudeksi horisontaalisesti tulee 36,97 mm (kuva 32). Ohuemman louhetäytön kohdissa (laskentamalli 2) paalun siirtymä on maksimissaan 31,93 mm (kuva 32). Suurimmat siirtymät tapahtuvat paalun puolivälissä.

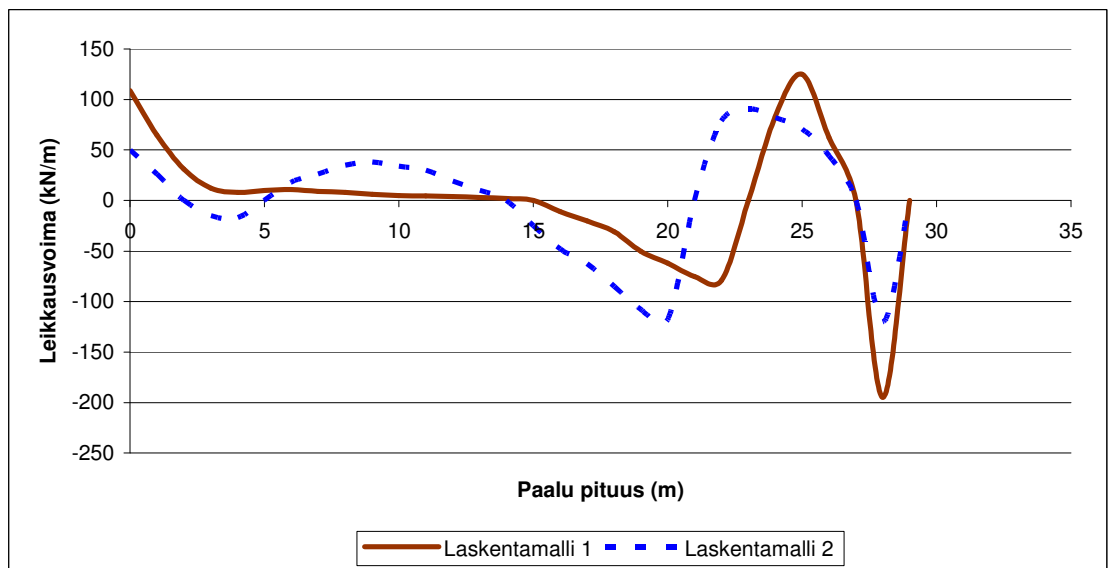


Kuva 32 Paalun siirtymät

KTK-penkereen liikkeistä aiheutuu suojaseinään taivutusmomenttia, joka on suurimmillaan laskentamallin 1 tapauksessa 208,3 kNm/m ja laskentamallin 2 tapauksessa 236,6 kNm/m (kuva 33). Maaperän liikkeistä paaluun aiheutuva leikkausvoima vaihtelee kuvan 34 mukaisesti, suurimmillaan se on yhteen paaluun laskentamallin 1 tapauksessa 194,7 kN/m ja laskentamallin 2 tapauksessa 120,5 kN/m.



Kuva 33 Momenttijakautuma



Kuva 34 Leikkausvoimat

7 Johtopäätökset ja yhteenveto

Kun paaluun kohdistuu vaakakuormitusta, on maaperän koostumuksella ja paalun oikealla mitoittamisella suuri merkitys. Maaperän ollessa hyvin löyhää ei siitä synny tarpeeksi tukea paalulle. Tämä lisää paalun nurjahduksen vaaraa vaakakuorman edesauttamana. Pelkkä sivuvastus on tällöin liian pieni antamaan tukea vaakakuormaa vastaan, joten paalutuksia on suunniteltava vaakakuorma yhtenä määräävistä tekijöistä.

Paaluun syntyy vaakavoimia ja taipumista, jos sen viereen sijoittuu suuri pinta-kuorma (esim. penger tai muu rakenne) tai maaperässä on paalun sivulla raskaampaa maamassaa kuin paalutusalueella tai jos paalutusten viereen tehdään kaivanto. Paalun kantokyvyn vähenemisestä kärsivät paalujen yläpuoliset rakenteet, kun paalujen kantokyky ei enää riitäkään siihen, mihin se on alun perin mitoitettu. Paalun katkeaminen tai taipuminen rasittaa yläpuolisia rakenteita aiheuttaen painumia tai halkeilua rakenteissa.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli määrittää Helsingin Toukorannan alueella sijaitsevan savikerrosten päällä ”kelluvan” louhepenkereen aiheuttamat kuormitukset ja siirtymät sen länsipuolella sijaitsevan paalulaatan reunassa olevaa suojaseinää vasten. Louhepenger (josta käytetään nimitystä KTK-penger) sijaitsee alapuolelta ja sivuilta savikerrosten ympäröimänä ja painuu niihin hiljalleen. KTK-penkereen tilanne johtuu pohjaantäytön epäonnistumisesta. Toukorannan historia on muutenkin varsin moninainen sisältäen mereen täyttöä, louhepenkereitä, pehmeitä savikerroksia, KTK-penkereen sortumisen ja maaperän pilaantumista.

Suojaseinään käytettiin paalulaatan paaluja (RR-teräspaalut Ø220 ja teräsbe-tonipaalut 300x300) huomattavasti suurempia paaluja (RR-teräspaalut Ø700), joiden kapasiteetti sivukuormitukselle on tällöin parempi kuin paalulaatan paalujen. Suojaseinän paalut mitoitettiin siis KTK-pengertä silmällä pitäen, joten yläpuolista kuormitusta tarkastellessa paalut ovat ylimitoitettuja.

Saven leikkauslujuus Toukorannan alueella vaihtelee välillä 6...17 kPa ollen suu-
relta osin alle 10 kPa, joten paalun sivuvastus ei ole kovin suuri. Toisaalta paalu-
laatta on hyvin suuri ja omaa näin ollen suuren kapasiteetin myös vaakakuormia
vastaan. Osa laatan normaaleista paaluista on paalutettu tätä varten 20:1-vinoon.
Tiedetään kuitenkin, että KTK-penger on jo kerran aikaisemmin sortunut, joten on
hyvin todennäköistä, että sen aiheuttama maanpaine paaluja vastaan olisi ollut
liian suuri laatan paaluille. KTK-penger olisi tällöin voinut valua laatan alle tai-
vuttaen paaluja ja vähentäen laatan kapasiteettia kantaa pengerrystä ja rakennuk-
sia.

KTK-penkereen liikkeitä ja siitä aiheutuvia kuormituksia tutkittiin mallintamalla
maaperää ja suojaseinärakennetta FEM-menetelmällä Plaxis-ohjelman avulla ta-
somuodonmuutostilassa. Laskentaohjelmalla saadut tulokset vastaavat tilaajan
urakka-asiakirjoja.

Plaxiksen laskemat suurimmat siirtymät tapahtuvat alueella, jossa KTK-penger
loppuu ja savikerrokset alkavat. Tämä alue on maaperässä näin ollen vaarallisinta
ja epävakasta aluetta. RR711-paalut on sijoitettu tälle vaarallisimmalle vyöhyk-
keelle.

Plaxis-laskelmien perusteella suojaseinään kohdistuva KTK-penkereestä syntyvä
taivutusmomentti on suurimmillaan 236,6 kNm/m. Leikkausvoiman suuruus on
suurimmillaan 194,7 kN/m. Laskelmien perusteella suojaseinän paalun maksimi-
siirtymäksi horisontaalisesti määräytyi 37 mm.

Louhetäytön paksuus puolestaan on suoraan verrannollinen siitä aiheutuvien
kuormitusten ja paalun taipuman suuruuteen. Paksuimmillaan louhetäytöstä (noin
20 metriä) olisi aiheutunut laatan paaluihin suurempia taipumia kuin nyt rakennet-
tuun suojaseinään. Laskelmien perusteella RR711-suojaseinän käyttäminen pie-
nensi maanpaineita paalulaatan alapuolisessa savikerroksessa.

Vaikka maaperä on hyvin sekalaatuista, saatiin Plaxis-laskennalla kuitenkin suh-
teellisen realistinen kuva maaperässä tapahtuvista liikkeistä ja siinä liikkuvista

voimista. Sekalaatuisuudesta johtuen (esim. louheen sisältämät savikeskittymät ja suuremmat lohkarieet) Plaxiksen Mohr-Coulombin mukaiset materiaalmallit antavat tarpeeksi hyvän kuvan maaperästä.

Toukorannan maaperästä on tehty joitakin laskelmia (Takala, 2004; Hassan, 2006) sekä muutamia muita diplomitöitä (mm. Leppänen, 1989; Kemppainen, 2006; Hassan, 2006) vuosien varrella. TKK:n Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa tehtiin maaperän siirtymistä laskenta diplomityön (Hassan, 2006) muodossa, jossa maaperän sivusiirtymiksi saatiin suurimmillaan noin 0,1 metriä, toiset laskelmat (Takala, 2004) taas kertoivat maaperän sivusiirtymiksi noin 0,2 metriä. Näissä laskennoissa mallinnettiin maaperään sijoitetun kaivannon sekä sen lähistöllä sijaitsevan täyttöpenkereen aiheuttamia siirtymiä. Tässä diplomityössä käytettiin samojen tutkimustulosten tietoja kuin laskennoissa (Takala, 2004) ja (Hassan, 2006). Paalun taipumista ja maan siirtymiä näiden aiempien laskelmien perusteella on vaikea verrata toisiinsa, koska maan siirtymiä ilman paalua ei laskettu. Paalun taipuminen kuitenkin viittaa siihen, että maan siirtymät ovat näiden laskelmien perusteella suuria.

Suojaseinän siirtymä ja siihen kohdistuvat voimat saavat jo suojaseinän suurissa paaluissa aikaan muodonmuutoksia, joten voidaan sanoa, että paalulaatan paaluissa (jotka ovat noin kolme kertaa pienempiä halkaisijaltaan tai sivun pituudeltaan) muodonmuutokset samoilla voimilla olisivat paljon suurempia niiden pienemmän taivutusjäykkyyden myötä. Jos paalulaatta olisi rakennettu ilman suojaseinää, olisivat laatan paalut KTK-penkereen vieressä olleet vaarassa taipua.

Lähteet

Avellan, Kari; Tornivaara-Ruikka, Riitta. 1990. Luku 15. Maanpaine. In: Mäkelä, Harri (toim.). RIL 157–2. Geomekaniikka II. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. S. 149–198.

Hansbo, Sven. 1994. Foundation Engineering. Amsterdam, Developments in Geotechnical Engineering, 75, Elsevier. 519 s.

Hassan, Md. Mamunul. 2006. Deformation Behaviour and Permeability of Soft Finnish Clay. Master's Thesis. Espoo. Laboratory of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki University of Technology. 62 s. (+24 s.).

Helenelund, K.V. 1956. Pohjarakennus ja maarakennusmekaniikka I. Geotekniikka. Helsinki. Teknillinen korkeakoulu, Moniste n:o 137. 233 s.

Helsingin karttapalvelu. Kaupunkimittausosasto, Helsinki. Verkkodokumentti haettu 2.10.2007 osoitteella Berliininkatu 3. <http://kartta.hel.fi/opas/>

Kempfert, H.-G.; Eigenbrod; K. D.; Smolczyk, U. 2003. 3.2 Pile Foundations. In: Smolczyk, U. (toim.) Geotechnical Engineering Handbook, Volume 3: Elements and Structures. Berlin. Ernst & Sohn. S. 83-227.

Kemppainen, Hannu. 2006. Paalutustyöt vaikeasti läpäistävien täyttöjen kohdalla. Diplomityö. Espoo. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio. Teknillinen korkeakoulu. 87 s.

Leppänen, Mikko. 1989. Vahvistinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa. Diplomityö. Espoo. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio. Teknillinen korkeakoulu. 98 s.

LPO-2005. 2005. Lyöntipaalutusohje. Helsinki. Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y. ja Rakentajain Kustannus Oy. 134 s.

Olsson, Connie; Holm, Göran. 1993. Pålgrundläggning. Stockholm. AB Svensk Byggtjänst och Statens Geotekniska Institut. S.145–157.

Plaxis Version 8 Manuals. 2005. Verkkodokumentti luettu 26.10.2007.
<http://www.plaxis.nl/index.php?cat=manuals&mouse=Plaxis%20V8>

Rantamäki, Martti; Tammirinne, Markku. 1979. Pohjarakennus. Hämeenlinna. Otatieto Oy, 465. 232 s.

RIL 95. 1974. Pohjarakennus. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 459 s.

Ruukki. 2005. Pohjarakenteet. Verkkodokumentti luettu 19.8.2007.
[http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/741C7B0215EB72CEC2257244003FBD2C/\\$File/Pohjarakenteet_09.2005_esite_FI.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/741C7B0215EB72CEC2257244003FBD2C/$File/Pohjarakenteet_09.2005_esite_FI.pdf?openElement) 16 s.

Ruukki. 2007. RR-paalutusohje. Verkkodokumentti luettu 13.12.2007.
[http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/364DDA1DFBE320E9C225723D00338160/\\$File/RR-paalutusohje.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/364DDA1DFBE320E9C225723D00338160/$File/RR-paalutusohje.pdf?openElement) 24 s.

Slunga, Eero et al. 1986. Luku 8. Paaluperustukset. In: Vähäaho, Ilkka (toim.). RIL 166 Pohjarakenteet. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. S. 159–228.

Takala, Jonni. 2004. Toukoranta, sivusiirtymät: TKK:n suorittamat Plaxis-laskelmat. Selvitys. Espoo. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu.

Uudenmaan ympäristökeskus. 2007. Ympäristölupapäätös No YS 305/17.2.2007. Verkkodokumentti luettu 19.8.2007.
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=47258&lan=FI> 40 s.

Liitteet

Liite 1 Toukorannan esirakentamisvaihe 3. Louhetäyttöjen ja pohjarakenteiden sijainnit. 1 s.

Liite 2 Ödometrikokeiden tuloksia. 2 s.

Liite 3 Plaxis-laskelmat, paksu louhetäyttö (kuvan 23 laskentamallin mukainen tilanne). Elementtiverkko kuvassa 24. 7 s.

A Maaperän kokonaissiirtymät (nuolikuviot)

B Paalun kokonaissiirtymät, $U_{\text{tot}} = 37,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

C Paalun leikkausvoima, $Q_{\text{max}} = 194,73 \text{ kN/m}$

D Paalumomentti, $M_{\text{max}} = 208,32 \text{ kNm/m}$

E Maanpaineen jakautuminen ja sen resultantti

F Maaperän leikkausjännitykset

G Maaperän plastisuuspisteet

Liite 4 Plaxis-laskelmat, ohut louhetäyttö (kuvan 25 laskentamallin mukainen tilanne). Elementtiverkko kuvassa 26. 7 s.

A Maaperän kokonaissiirtymät (nuolikuviot)

B Paalun kokonaissiirtymät, $U_{\text{tot}} = 32,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

C Paalun leikkausvoima, $Q_{\text{max}} = 120,45 \text{ kN/m}$

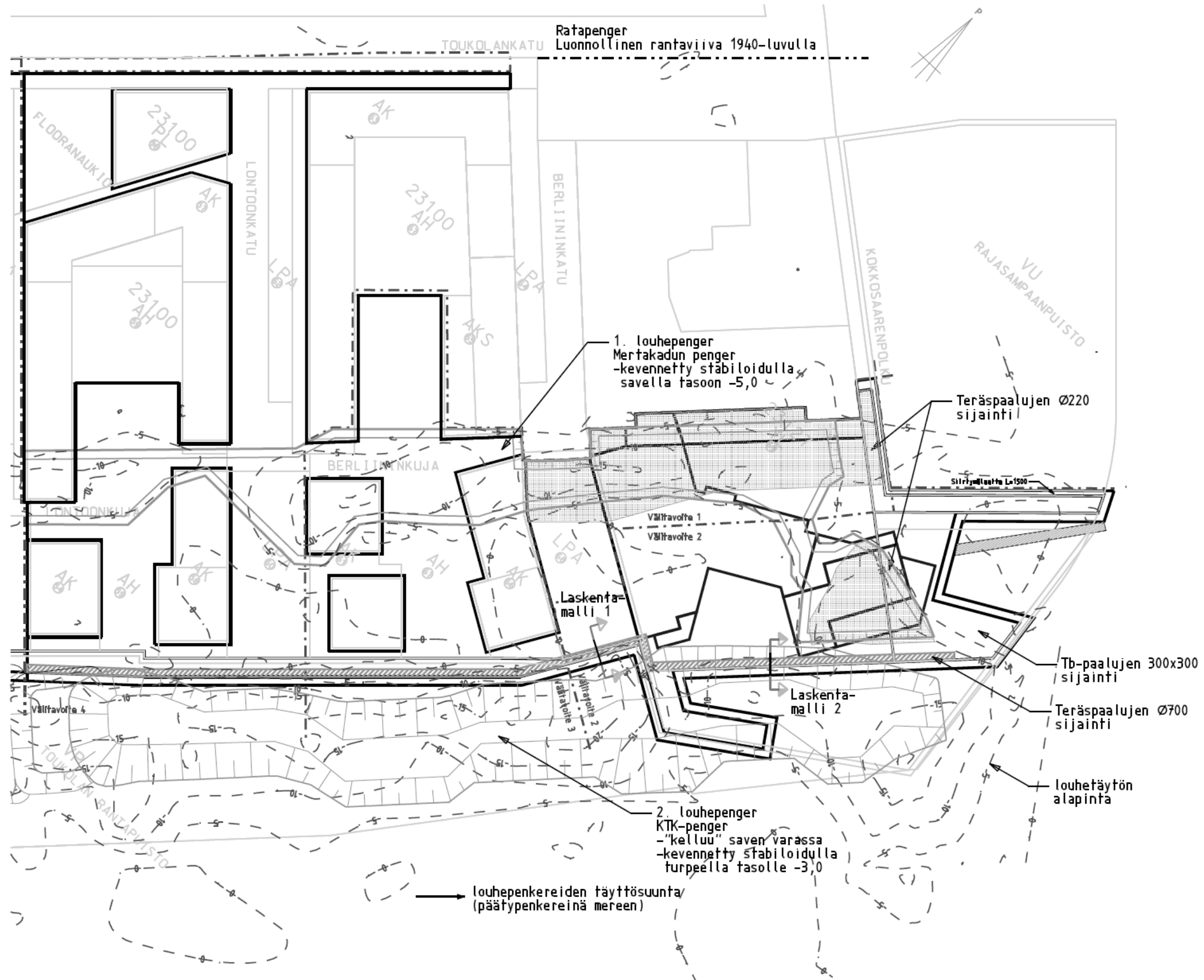
D Paalumomentti, $M_{\text{max}} = 236,63 \text{ kNm/m}$

E Maanpaineen jakautuminen ja sen resultantti

F Maaperän leikkausjännitykset

G Maaperän plastisuuspisteet

Huom.! Liitteiden 3 ja 4 toisiaan vastaavat kuviot eivät aina ole samassa mittakaavassa. Voimien ja siirtymien oikea mittakaava on esitetty kyseisen kuvan vasemmassa laidassa.



TKK/RY

Pohjarakennus ja maamekaniikka

.25.10.2004

TOUKORANTA

HELSINKI

Taulukko 4. Ödometrikokeiden näytetiedot

Koe n:o	Piste n:o	Putki n:o	Syvyys z m	A cm ²	h ₀ cm	γ ₀ kN/m ³	w ₀ %	e ₀	S _r %	Huom.!	Apu- syvyys m
4217	45 St2	Hki 2	3,89-3,91	15,9	1,5	8,21	100	2,72	100		3,9
4218	45 St2	Hki 5	4,59-4,62	15,9	1,5	13,51	120	3,03	100		4,6
4219	45 St2	Hki 8	5,49-5,52	15,9	1,5	13,36	131	3,41	100		5,5
4220	45 St2	Hki 11	6,29-6,32	18,1	2	13,46	121	3,19	100		6,3
4276	45 St2	Hki 16	8,42-8,44	15,9	1,5	14,37	100	2,61	100		8,4
4222	45 St2	Hki 17	8,49-8,52	18,1	2	13,99	107	2,78	100		8,5
4277	45 St2	Hki 19	9,42-9,44	15,9	1,5	14,15	108	2,75	100		9,4
4223	45 St2	Hki 20	9,49-9,52	18,1	2	14,47	106	2,63	100		9,5
4224	45 St2	Hki 23	10,49-10,52	18,1	2	14,68	93	2,35	84		10,5
4225 B	45 St2	Hki 25	11,31-11,34	18,1	2	15,47	81,7	2,109	100		11,3
4226	45 St2	Hki 29	12,49-12,51	18,1	2	15,63	83	1,99	64		12,5
4246	45 St2	Hki 32	13,49-13,52	18,1	2	14,23	107	2,71	100		13,5
4247	45 St2	Hki 35	14,49-14,52	18,1	2	14,23	114	2,83	100		14,5
4248	45 St2	Hki 38	15,49-15,52	18,1	2	15,58	80	1,94	88		15,5
4249	45 St2	Hki 41	16,49-16,52	18,1	2	15,94	66	1,76	43		16,5
4250	45 St2	Hki 44	17,49-17,52	18,1	2	18,9					17,5
4221	45 St2	Hki 14	7,09-7,12	18,1	2	14,09	113	3,61	100	PD	7,1
4278	45 St2	Hki 18	8,76-8,78	15,9	1,5	16,25	58	1,52	33,4		8,7
4287	45 St2	Hki 34	14,31-14,33	13,82	1,5	14,02	114	2,91	100		14,3

TKK/RY

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Otaniemi

TKK

Taulukko 9. Lambda & Kappa

Koe n:o	Piste n:o	Putki n:o	Syvyys z m	λ	κ	$\lambda /$ (1+ e0)	$\kappa /$ (1+ e0)	C_α	$C_\alpha /$ (1+ e0)	$k_1 \cdot$ 10^{-9} m/s σ_p (T)
4217	45 St2	Hki 2	3,89-3,91	0,532	0,101	0,143	0,027	0,14	0,038	0,223
4218	45 St2	Hki 5	4,59-4,62	0,596	0,101	0,148	0,025	0,153	0,038	0,209
4219	45 St2	Hki 8	5,49-5,52	0,698	0,128	0,158	0,029	0,187	0,042	0,199
4220	45 St2	Hki 11	6,29-6,32	0,589	0,099	0,141	0,024	0,146	0,035	0,167
4276	45 St2	Hki 16	8,42-8,44	0,574	0,075	0,159	0,021	0,143	0,040	0,206
4222	45 St2	Hki 17	8,49-8,52	0,603	0,071	0,160	0,019	0,19	0,050	0,2
4277	45 St2	Hki 19	9,42-9,44	0,593	0,074	0,158	0,020	0,127	0,034	
4223	45 St2	Hki 20	9,49-9,52	0,460	0,086	0,127	0,024	0,181	0,050	0,31
4224	45 St2	Hki 23	10,49-10,52	0,427	0,062	0,127	0,019	0,125	0,037	0,45
4225 B	45 St2	Hki 25	11,31-11,34	0,452	0,038	0,145	0,012	0,078	0,025	0,275
4226	45 St2	Hki 29	12,49-12,51	0,400	0,060	0,134	0,020	0,055	0,018	0,4
4246	45 St2	Hki 32	13,49-13,52	0,615	0,054	0,166	0,015	0,206	0,056	0,39
4247	45 St2	Hki 35	14,49-14,52	0,571	0,077	0,149	0,020	0,13	0,034	0,53
4248	45 St2	Hki 38	15,49-15,52	0,340	0,060	0,116	0,020	0,04	0,014	0,22
4249	45 St2	Hki 41	16,49-16,52	0,310	0,060	0,112	0,022	0,045	0,016	0,35
4250	45 St2	Hki 44	17,49-17,52			0,000	0,000		0,000	
4221	45 St2	Hki 14	7,09-7,12	0,370	0,060	0,080	0,013	0,1	0,022	0,29
4278	45 St2	Hki 18	8,76-8,78	0,260	0,024	0,103	0,010		0,000	0,46
4287	45 St2	Hki 34	14,31-14,33	0,880	0,090	0,225	0,023	0,08	0,020	0,19

